

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Tomislav Kvočić

Zagreb, 2010.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Voditelji rada:

Prof. dr. sc. Janoš Kodvanj

Zvonimir Tomičević, mag. ing. mech.

Tomislav Kvočić

Zagreb, 2010.

IZJAVA

Izjavljujem pod punom materijalnom i moralnom odgovornošću da sam diplomski rad izradio samostalno, isključivo znanjem stečenim na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Zahvaljujem se svojim voditeljima rada, prof. dr. sc. Janošu Kodvanju i Zvonimiru Tomičeviću, mag. ing. mech. te asistentu Martinu Surjaku, mag. ing. mech. na uloženom trudu, pruženoj pomoći i korisnim savjetima prije i tijekom izrade ovog rada.

Potpis :

Sažetak

U današnje vrijeme kada je produljena životna dob brojna je populacija ljudi starija od 60 godina. U tim godinama česti su prijelomi vrata bedrene kosti koji se događaju uslijed pada s većih visina i naglih pokreta. U svrhu bržeg zacjeljivanja vrata bedrene kosti ugrađuje se gama čavao. Gama čavao je implantat koji se ugrađuje u bedrenu kost zatvorenim operativnom tehnikom koja smanjuje traumu, gubitak krvi i mogućnost infekcije.

U radu je provedeno ispitivanje dinamičke izdržljivosti gama čavla prema normi ASTM F384-06. Prema preporuci norme prije dinamičkog ispitivanja statičkim savojnim ispitivanjem određena je visina potrebnog cikličkog opterećenja. Za pridržavanje implantata tijekom statičkog i dinamičkog ispitivanja konstruirana je naprava koja je učvršćena na radnu plohu kidalice. Eksperimentalni rezultati kontrolirani su numeričkom metodom konačnih elemenata. Podaci o materijalu neophodni za provedbu računalne simulacije određeni su statičkim vlačnim pokusom na standardnim epruvetama.

Ključne riječi: gama čavao, dinamičko ispitivanje, zamorna čvrstoća

Summary

At the present time living age of populations is extended on more than 60 years old. In those years are common femoral neck fractures that occur due to falls from a higher position and sudden movements. In order to heal faster femoral neck incorporates a gamma nail. Gamma nail is the implant that is inserted into the femur closed surgical technique that reduces trauma, blood loss and the possibility of infection.

Test of dynamic strength of gamma nail was carried out according to the ASTM F384-06. According to the recommendation before the dynamic test standard static bending test has been determine the height of the required cyclic loading. Acceptation of the implants during the static and dynamic tests is designed a device that is fastened to the working surface of the testing machine.

Experimental results controlled by numerical finite element method. Information on the materials necessary for the implementation of computer simulations are determined with static tensile test on standard test tubes.

Key words: gamma nail, dynamic testing, fatigue strength

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA	V
POPIS OZNAKA	VI
<i>Latinične oznake</i>	<i>VI</i>
<i>Grčke oznake</i>	<i>VII</i>
1. UVOD	1
2. GAMA ČAVAO	3
2.1 Bedrena kost	3
2.2 Značajke dizajna gama čavla	5
2.2.1 <i>Anatomska učinkovitost</i>	<i>5</i>
2.2.2 <i>Dijelovi gama čavla</i>	<i>6</i>
2.2.3 <i>Biomehaničke prednosti</i>	<i>7</i>
2.3 Priprema i ugradnja gama čavla	7
2.3.1 <i>Izbor implantata</i>	<i>7</i>
2.3.2 <i>Priprema operativnog zahvata</i>	<i>9</i>
2.3.3 <i>Proširivanje medularne šupljine</i>	<i>10</i>
2.3.4 <i>Pozicioniranje čavla</i>	<i>14</i>
2.3.5 <i>Priprema i ugradnja lag vijka</i>	<i>15</i>
2.3.6 <i>Ugradnja distalnog vijka</i>	<i>20</i>
2.4 Vađenje gama čavla	22
3. STANDARDNE SPECIFIKACIJE I ISPITNE METODE ZA KUTNE METALNE IMPLANTATE PREMA NORMI ASTM F384–06	24
3.1 Domena	24
3.2 Princip standardne ispitne metode za statičko tlačno savijanje metalnog kutnog uređaja	24
3.2.1 <i>Sažetak testne metode</i>	<i>25</i>
3.2.2 <i>Važnost i upotreba</i>	<i>25</i>
3.2.3 <i>Procedura ispitne metode</i>	<i>26</i>
3.3 Princip standardne ispitne metode za određivanje savojnih zamornih svojstava metalnog kutnog implantata	27
3.3.1 <i>Sažetak testne metode</i>	<i>27</i>
3.3.2 <i>Važnost i upotreba</i>	<i>27</i>
3.3.3 <i>Testni uzorci</i>	<i>28</i>
3.3.4 <i>Procedura ispitivanja</i>	<i>28</i>

4. PROVEDBA EKSPERIMENATA	30
4.1 Priprema gama čavla za statički i dinamički test.....	30
4.2 Provedba statičkog ispitivanja	33
4.3 Provedba dinamičkog ispitivanja.....	35
5. REZULTATI ISPITIVANJA	37
5.1 Rezultati statičkog eksperimenta	37
5.2 Rezultati dinamičkog eksperimenta.....	38
6. NUMERIČKO MODELIRANJE POMAKA GAMA ČAVLA	39
6.1 Metoda konačnih elemenata	39
6.1.1 3D konačni elementi	39
6.1.2 Osnovni tetraedarski element	40
6.1.3 Tetraedarski elementi višeg reda.....	43
6.2 Programski paket <i>Abaqus</i>	45
6.3 Numerički model gama čavla	48
6.3.1 Definiranje mehaničkih veza, opterećenja i rubnih uvjeta.....	50
6.3.2 Generiranje mreže konačnih elemenata	51
6.4 Analiza rezultata dobivenih metodom konačnih elemenata	52
6.4.1 Analiza pomaka gama čavla.....	52
6.4.2 Analiza deformacija i naprezanja gama čavla.....	53
7. ZAKLJUČAK	56
8. LITERATURA.....	57
9. PRILOG	58

POPIS SLIKA

Slika 2.1 Gama čavao montiran u bedrenoj kosti	3
Slika 2.2 Bedrena kost	4
Slika 2.3 Prikaz CCD kuta bedrene kosti	5
Slika 2.4 Dijelovi gama čavla	6
Slika 2.5 Podložna folija čavla	8
Slika 2.6 Rendgenska snimka slomljene bedrene kosti	8
Slika 2.7 Položaj pojačala slike	9
Slika 2.8 Prikaz namještanja prijeloma kosti za pojačalo slike	10
Slika 2.9 Preporučeni specijalni instrumentarij	10
Slika 2.10 Prikaz umetanja Kirschner igle	11
Slika 2.11 Horizontalni rez kože	11
Slika 2.12 Prikaz ulaza šila u kost	12
Slika 2.13 Proširivanje trohanterškog područja	13
Slika 2.14 Spuštanje vodilice razvrtača	13
Slika 2.15 Proširivanje medularne šupljine	14
Slika 2.16 Prikaz montiranja čavla u vodilici za uvađanje	14
Slika 2.17 Umetanje čavla	15
Slika 2.18 Usmjeravanje lag vijka	15
Slika 2.19 Prikaz fiksiranog položaja vodilice lag vijka	16
Slika 2.20 Bušenje lateralnog korteksa	16
Slika 2.21 Prikaz idealnog položaja Kirschner igle nakon bušenja	17
Slika 2.22 Određivanje duljina lag vijka	17
Slika 2.23 Podešavanje duljine bušenja	17
Slika 2.24 Bušenje provrta za lag vijak	18
Slika 2.25 Spojeni lag vijak s odvijačem za lag vijak	18
Slika 2.26 Fiksiranje lag vijka	19
Slika 2.27 Određivanje položaja za ulaz distalnog vijka	20
Slika 2.28 Označavanje mjesta bušenja u bočnom korteksu	20
Slika 2.29 Bušenje bočnog korteksa za distalni vijak	21
Slika 2.30 Mjerenje dužine distalnog vijka	21
Slika 2.31 Uvođenje distalnog vijka	21
Slika 2.32 Prikaz ugrađenog gama čavla u prednje-stražnjoj i bočnoj ravnini	22
Slika 2.33 Povezivanje odvijača s lag vijkom	22
Slika 2.34 Uklanjanje vijak kape i odvijanje vijka za zaključavanje	23
Slika 3.1 Prikaz testne konfiguracije	25
Slika 3.2 Dijagram opterećenje/pomak	26
Slika 4.1 CAD model postolja prihvata gama čavla	30
Slika 4.2 CAD model prihvata koji se pričvršćuje na postolje	31
Slika 4.3 CAD model pomičnog dijela prihvata	31
Slika 4.4 CAD model prihvata gama čavla	32
Slika 4.5 Položaj postolja za provedbu eksperimenta	32
Slika 4.6 Servohidraulička kidalica LFV 50-HH, Walter+Bai	33
Slika 4.7 Pozicionirani uzorak za statički eksperiment	34
Slika 4.8 Deformacija gama čavla nakon statičkog ispitivanja	34
Slika 4.9 Pozicionirani uzorak za dinamičko ispitivanje	35
Slika 4.10 Gama čavao nakon dinamičkog eksperimenta	36
Slika 5.1 Dijagram opterećenje-pomak pri statičkom ispitivanju	37
Slika 5.2 Dijagram pomak-ciklus	38

Slika 6.1 Osnovni tetraedarski konačni element	40
Slika 6.2 Tetraedarski konačni element drugog reda	43
Slika 6.3 Numeriranje čvorova za izvođenje funkcija oblika u prirodnim volumenskim koordinatama	44
Slika 6.4 Tijek analize u programskom paketu Abaqus	46
Slika 6.5 Abaqus proizvodi i faze izrade modela	47
Slika 6.6 Tipovi konačnih elemenata programskog paketa <i>Abaqus</i>	47
Slika 6.7 3D model čavla.....	48
Slika 6.8 3D model lag vijka	48
Slika 6.9 Dimenzije epruvete za statički vlačni pokus	49
Slika 6.10 Dijagram naprezanje-deformacija za materijal prema ISO 5832-1	49
Slika 6.11 Aproksimiranje krivulje tečenja materijala ISO 5832-1	50
Slika 6.12 Prikaz površina na kojima je definirana čvrsta veza	50
Slika 6.13 Prikaz djelovanja opterećenja.....	51
Slika 6.14 Prikaz modela sa zadanim rubnim uvjetima.....	51
Slika 6.15 Prikaz mreže konačnih elemenata čavla.....	52
Slika 6.16 Prikaz mreže konačnih elemenata lag vijka	52
Slika 6.17 Vertikalni pomaci lag vijka pri opterećenju sa silom od 937,5 N.....	53
Slika 6.18 Naprezanja prema Von Misesu pri opterećenju sa silom od 937,5 N	53
Slika 6.19 Prikaz maksimalnih naprezanja gama čavla.....	54
Slika 6.20 Deformacije pri opterećenju od 937,5 N.....	54
Slika 6.21 Prikaz plastičnih deformacija pri opterećenju sa silom od 937,5 N.....	55

POPIS TABLICA

Tablica 5.1 Rezultati statičkog ispitivanja.....	37
Tablica 5.2 Očitane vrijednosti pomaka	38
Tablica 6.1 Svojstva materijala	49
Tablica 6.2 Vrijednosti naprezanja i deformacija za plastično područje.....	50

POPIS OZNAKA

Latinične oznake

A	[%]	-postotak produljenja epruvete nakon loma
a	-	-matrica koeficijenata u interpolacijskim polinomima
B	-	-matrica ovisnosti deformacije u elementu o pomacima u čvorovima, matrica prelogaritamskih energetskih članova
C	-	-matrica ovisnosti stupnjeva slobode o koeficijentima interpolacijskih polinoma
D	-	-matrica elastičnosti
d	[mm]	-promjer ispitnog uzorka za statički vlačni pokus
D_K	-	-kinematički diferencijalni operator
E	[MPa]	-modul elastičnosti
f	[Hz]	-frekvencija
F	[N]	-sila
K	-	-matrica krutosti konačnog elementa paketu <i>Abaqus</i>
q	[mm]	-deformacija
R_m	[MPa]	-vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	[MPa]	-konvencionalna granica razvlačenja
S	-	-matrica raspodjele naprezanja u konačnom elementu
S_{max}	[mm]	-eksperimentalno dobiveni maksimalni vertikalni pomak
S_{min}	[mm]	-eksperimentalno dobiveni minimalni vertikalni pomak
u, v, w	[mm]	-komponente pomaka u Kartezijevom koordinatnom sustavu
u_i, v_i, w_i	[mm]	-komponente pomaka i -tog čvora konačnog elementa
V	[mm ³]	volumen
x, y, z	[mm]	-Kartezijeve koordinate
Y	[N]	-dopušteno opterećenje

Grčke oznake

ε	-	-deformacija
ν	-	-Poissonov koeficijent
σ	[N/mm ²]	-naprezanje

1. UVOD

Prijelom vrata bedrene kosti najčešće se događa u starijih ljudi. Često se pritom ozljede i brojne krvne žile koje ulaze u vrat bedrene kosti tako da produljuju zarastanje prijeloma. Prijelom između velikog i malog obrtača (intertrohanterični prijelom) i kroz obrtače (pertrohanterški prijelom) česti su u osoba starijih od 60 godina. Prijelomi su učestaliji u žena te dobi zbog gubitka koštanog tkiva prouzročenog postmenopauzalnom osteoporozom.

Učestalost tih prijeloma raste sa životnom dobi. Oni se jasno prezentiraju i lakše dijagnosticiraju. Smrtnost od prijeloma kuka u prvoj godini nakon prijeloma iznosi od 12 do 20% i gotovo se ne razlikuje u zemljama s vrlo različitim stupnjem zdravstvenog standarda. Neposredni uzroci prijeloma su pad s velike visine i nagli pokreti.

U svrhu bržeg zacjeljivanja vrata bedrene kosti, kod intertrohanterškog i pertrohanterškog prijeloma, implantira se gama čavao. Gama čavao je oblikovan za postizanje optimalne efikasnosti u operativnoj tehnici i kasnijem oporavku. Dvije su osnovne komponente, univerzalne primjene, kod fraktura lijeve ili desne bedrene kosti, a zajedno su učinkovite kod velikog broja kliničkih situacija i kompleksnih prijeloma. Ugradnja implantata se u potpunosti radi zatvorenim operativnom tehnikom koja smanjuje traumu, gubitak krvi i mogućnost infekcije.

Dodatna čvrstoća, postignuta biomehaničkim prednostima gama čavla, u kombinaciji s poboljšanom kontrolom osnog produženja i rotacijske nestabilnosti, omogućuje rano zarastanje čak i kod nestabilnih proksimalnih lomova. Ranija pokretljivost u kombinaciji s dinamičkom kompresijom i manje traumatskom operativnom tehnikom povećava šanse za uspješan i pouzdan oporavak pacijenta.

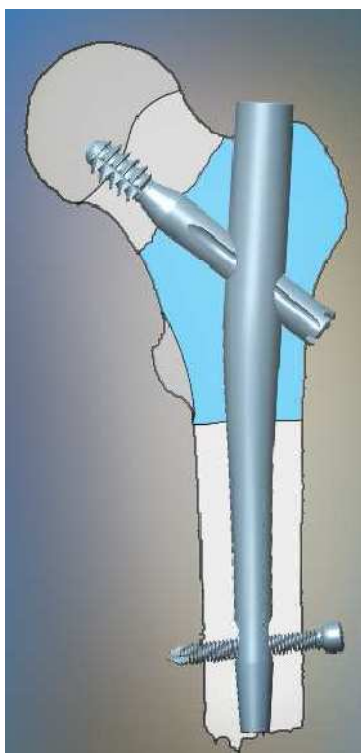
U Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje provedeni su eksperimenti opterećenja gama čavla statičkim i dinamičkim ispitivanjem. Ispitni uzorci zaprimljeni su od tvrtke Instrumentaria d.d. Ispitivanje izdržljivosti gama čavla određeno je prema normi ASTM F 384-06 u kojoj su definirani svi uvjeti i parametri eksperimenta.

U drugom poglavlju opisani su dijelovi gama čavla i operacijski postupak implantiranja. U trećem poglavlju navedeni su zahtjevi norme ASTM F384-06 za provođenje statičkog tlačnog savijanja i cikličkog ispitivanja gama čavla. Četvrto poglavlje opisuje provedbu eksperimenata, a rezultati statičkog i dinamičkog ispitivanja dani su u petom poglavlju. Numeričko modeliranje pomaka gama čavla metodom konačnih elemenata prikazano je u šestom poglavlju. Zaključci

izvedeni na temelju eksperimentalnih ispitivanja i računalne simulacije navedeni su u sedmom poglavlju.

2. GAMA ČAVAO

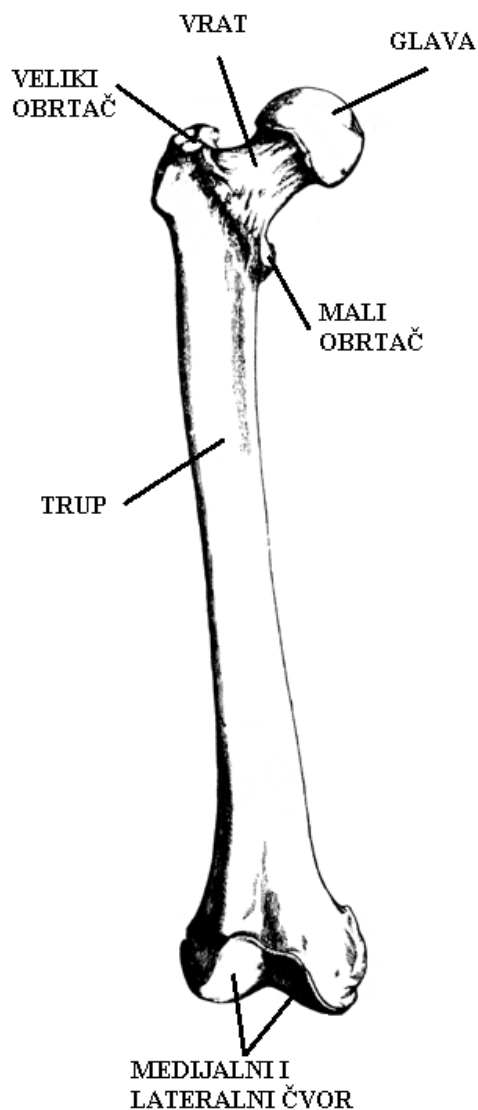
Gama čavao (slika 2.1) se koristi za medularnu osteosintezu, odnosno za osteosintezu koja ide kroz kanal dugih kostiju, a služi za fiksaciju prijeloma proksimalnog dijela natkoljenice (prijelom vrata bedrene kosti). Prednost ove vrste osteosinteze je brzo cijeljenje kosti, što omogućuje bržu rehabilitaciju bolesnika, a osnovni nedostaci su razmjeno visoka cijena u usporedbi s osteosintezom DHS i DCS pločicama te nemogućnost primjene kod mnogoivernih prijeloma. Gama čavao se primjenjuje kod intertrochanterskog, pertrochanterskog i visokog subtrochanterskog prijeloma. Femuralno-proksimalni čavao na zaključavanje pruža značajno veću čvrstoću i stabilnost u kliničkoj upotrebi zbog njegovih biomehaničkih svojstava. [1]



Slika 2.1 Gama čavao montiran u bedrenoj kosti [1]

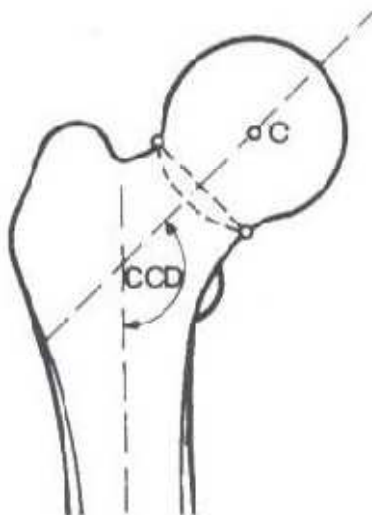
2.1 Bedrena kost

Bedrena kost ili femur (slika 2.2) je najdulja i najjača kost u ljudskom tijelu, duga do pola metra. Kao i svaka druga kost ima trup i dva kraja, proksimalni (gornji) i distalni (donji). Femur je jedina kost u natkoljenici i nalazi se između zgloba kuka i koljenog zgloba. [2]



Slika 2.2 Bedrena kost

Na proksimalnom kraju bedrene kosti nalazi se okruglasta glava koja ima zglobnu plohu, a se veže za čašicu zgloba kuka koja se naziva acetabulum. Glavu bedrene kosti s trupom spaja vrat. Glava s vratom je nagnuta prema trupu za kut oko 130° stupnjeva koji se naziva kolodijafizarnim kutom ili pravilnije CCD-kutom, slika 2.3. U mišićavih ljudi i u nekim oboljenjima kut je manji, *coxa vara*, a u slabije razvijenih ljudi i u bolesnika sa slabije razvijenim mišićima kut je veći, *coxa valga*. [3]



Slika 2.3 Prikaz CCD kuta bedrene kosti [3]

Glava i vrat bedrene kosti su izgrađeni od spužvastog tkiva koje je pojačano u smjerovima najvećeg tlaka i vlaka. Posebice je ojačana kompaktna kost na donjoj strani vrata jer su tamo najveća opterećenja pri prijenosu tjelesne težine s trupa na nogu. Na prelasku vrata u trup bedrene kosti nalaze se dva izbočenja, veliki i mali obrtač. Na veliki se obrtač hvataju zdjelični mišići. Mali obrtač nalazi se straga i medijalno na granici vrata i trupa i služi za hvatište mišiću. Trup bedrene kosti na presjeku je trokutasti zaobljenih vrhova, blago konveksan prema naprijed. Donji kraj bedrene kosti deblji je nego gornji, jer ima dva jaka čvora za zglob s koljeničnom kosti: medijalni i lateralni čvor. [2]

Vrat bedrene kosti najčešće se prelama u starijih ljudi. Često se pritom ozljede i brojne krvne žile koje ulaze u vrat tako da produljuju zarastanje prijeloma. Prijelom između velikog i malog obrtača (intertrohanterški prijelom) i kroz obrtače (peretrohanterški prijelom) česti su u osoba starijih od 60 godina. Prijelomi su učestaliji u žena te dobi zbog gubitka koštanog tkiva prouzročena postmenopauzalnom osteoporozom. [2]

2.2 Značajke dizajna gama čavla

2.2.1 Anatomska učinkovitost

Gama čavao na zaključavanje je oblikovan za postizanje optimalne efikasnosti u operativnoj tehnici i kasnijem oporavku. Dvije su osnovne komponente, univerzalne primjene, kod fraktura lijeve ili desne bedrene kosti, a zajedno su učinkovite kod velikog broja kliničkih

situacija i kompleksnih prijeloma. Ugradnja implantata se u potpunosti radi zatvorenim operativnom tehnikom koja smanjuje traumu, gubitak krvi i mogućnost infekcije. [1]

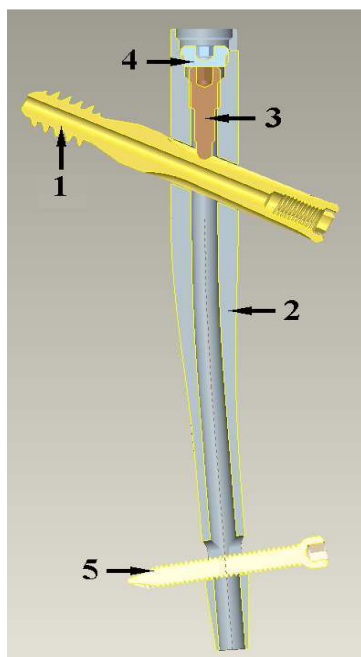
2.2.2 Dijelovi gama čavla

Intramedularni čavao (slika 2.4) integrira nekoliko važnih mehaničkih značajki. Anatomska konstrukcija je univerzalna za sve indicirane primjene, s profilom posebno oblikovanim za trohanterne lomove i ukupne dužine 180 mm. Čavao je prilagođen, odstupanjima u anatomske obliku femoralnog vrata, različitim kutovima ulaza lag vijka (125° , 130° , 135°). [1]

Distalni vijak (slika 2.4.) za zaključavanje se koristi za sprečavanje rotacije u složenim prijelomima. Probušen za vođenje žice odnosno kontrolirano unošenje, s konusnim vrhom, čavao je dostupan s jednim distalnim promjerom 11 mm. [1]

Lag vijak (slika 2.4) umetnut kroz mali urez na tijelu, uz pomoć vodilice, fiksira se vijkom za zaključavanje, te osigurava dinamičku kompresiju i aksijalnu stabilnost. Vijak za zaključavanje umeće se kroz proksimalnu glavu čavla, a zaključava lag vijak kroz jedan od četiri utora na njegovom tijelu. Utori su asimetričnog oblika te dopuštaju lag vijku klizanje u samo jednom smjeru i stvaranje dinamičke osteosinteze pomoću kompresije tijekom rane faze zarastanja. [1]

Lag vijak ima zaobljen profil navoja i samorezni dio oblikovan za lagano umetanje i otpornost na odvrtanje.



1 – lag vijak

2 – čavao

3 – vijak za zaključavanje

4 – vijak kapa

5 – distalni vijak

-proksimalni promjer 17 mm

-distalni promjer 11mm

-dužina čavla 180 mm

-kutevi 125° , 130° i 135°

Slika 2.4 Dijelovi gama čavla [1]

2.2.3 Biomehaničke prednosti

Nosiva os femuralno-proksimalnog čavla na zaključavanje je bliže nosivoj osi kuka nego kod DHS pločice pa je samim time i dužina kraka između nosive osi i sile na glavu femura manja. Iz toga razloga rezultantna sila se prenosi direktno dolje prema centru femura, što je bolje nego kroz više vijaka koji oslabljuju kost, a koriste se u DHS sustavu, istodobno povećavajući čvrstoću i pouzdanost sustava. [1]

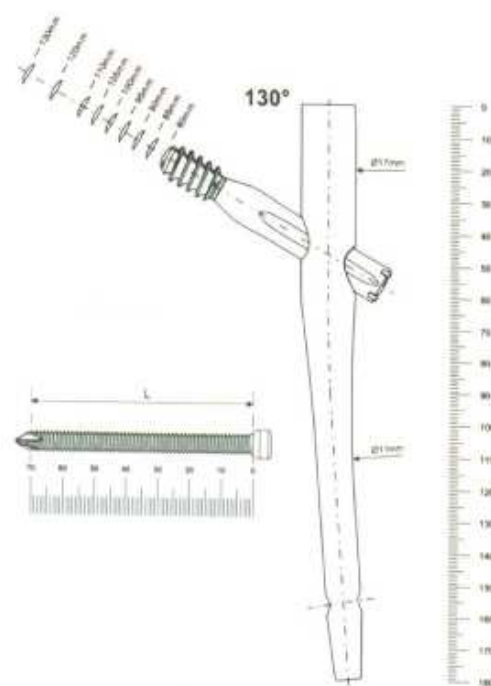
Dodatna čvrstoća, postignuta biomehaničkim prednostima gama čavla, u kombinaciji s poboljšanom kontrolom osnovnog produženja i rotacijske nestabilnosti, omogućuje rano zarastanje čak i kod nestabilnih proksimalnih lomova. Ranija pokretljivost u kombinaciji s dinamičkom kompresijom i manje traumatskom operativnom tehnikom, povećava šanse za uspješan i pouzdan oporavak pacijenta. [1]

2.3 Priprema i ugradnja gama čavla [1]

Kod većine pacijenata, može se bez poteškoća koristiti standardni čavao s kutom vrata 130°, čavli sa kutom 125° koriste se kod osteoartritične coxe vare, a s kutom 135° kod coxe valge.

2.3.1 Izbor implantata

Kod odabira tipa čavla, koji će se ugraditi, koriste se podložne folije čavla, slika 2.5, i rendgenske snimke slomljenog vrata bedrene kosti, slika 2.6. Podložne folije pokazuju pravu veličinu implantata, povećanu 15%. Za optimalni odabir čavla i rendgenska snimka mora biti snimljena pri istom povećanju, 15%. Kada se postigne ispravan anatomske položaj bedrene kosti, rendgenska snimka može se napraviti sa strane frakture kuka ili s kontralateralne strane.



Slika 2.5 Podložna folija čavla [1]



Slika 2.6 Rendgenska snimka slomljene bedrene kosti [1]

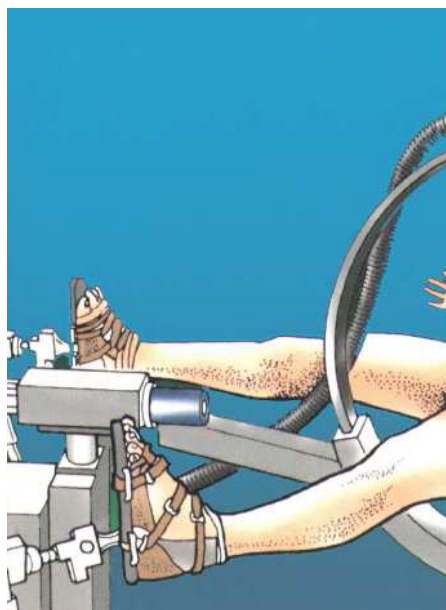
Točnim preklapanjem podložne folije čavla i rendgenske snimke ozlijeđenog kuka (bedrene kosti), dobiva se predložak na osnovu kojeg se izabire veličina lag vijka. Povećanje

predložka je također 15%. Sve dimenzije (ciljni kut i veličina implantata) koje su rezultat korištenja predložaka snimaka, mora provjeriti kirurg zbog osiguranja ispravnog odabira implantata.

2.3.2 Priprema operativnog zahvata

Pojačalo slike (mobilni rendgen) je uređaj koji služi za pregled pacijenta u realnom vremenu, za ispitivanje dinamičkih i funkcionalnih značajki koje se vide na zaslonu nakon što se selektivno apsorbirane rendgenske zrake poslije prolaza kroz tijelo pacijenta zaustave na istom. Za pripremu operativnog zahvata pojačalo slike se namjesti tako da se postigne prednje-stražnji i mediolateralni pogled trohanterškog područja ozlijeđene bedrene kosti, slika 2.7. Položaj je najlakše postići ako pojačalo slike može biti smješteno tako, da su osi rotacije na pojačalu centrirane na femoralnom vratu ozlijeđenog femura.

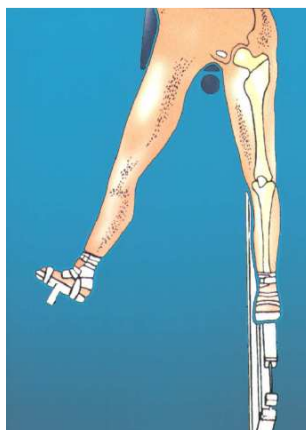
Važno je osigurati pogled na oba vrha čavla (i distalni i proksimalni) tijekom postupka, bez smetnji na stolu za trakciju.



Slika 2.7 Položaj pojačala slike [1]

Pacijenta se smješta na leđa, na stol za namještanje, a namještanje prijeloma kosti se postiže kao što je prikazano na slici 2.8. Neozlijeđena noga se odmakne što je dalje moguće s ciljem da se smjesti pojačalo slike. Tada je pacijent pripremljen i smješten kao kod uobičajenog namještanja frakture kuka.

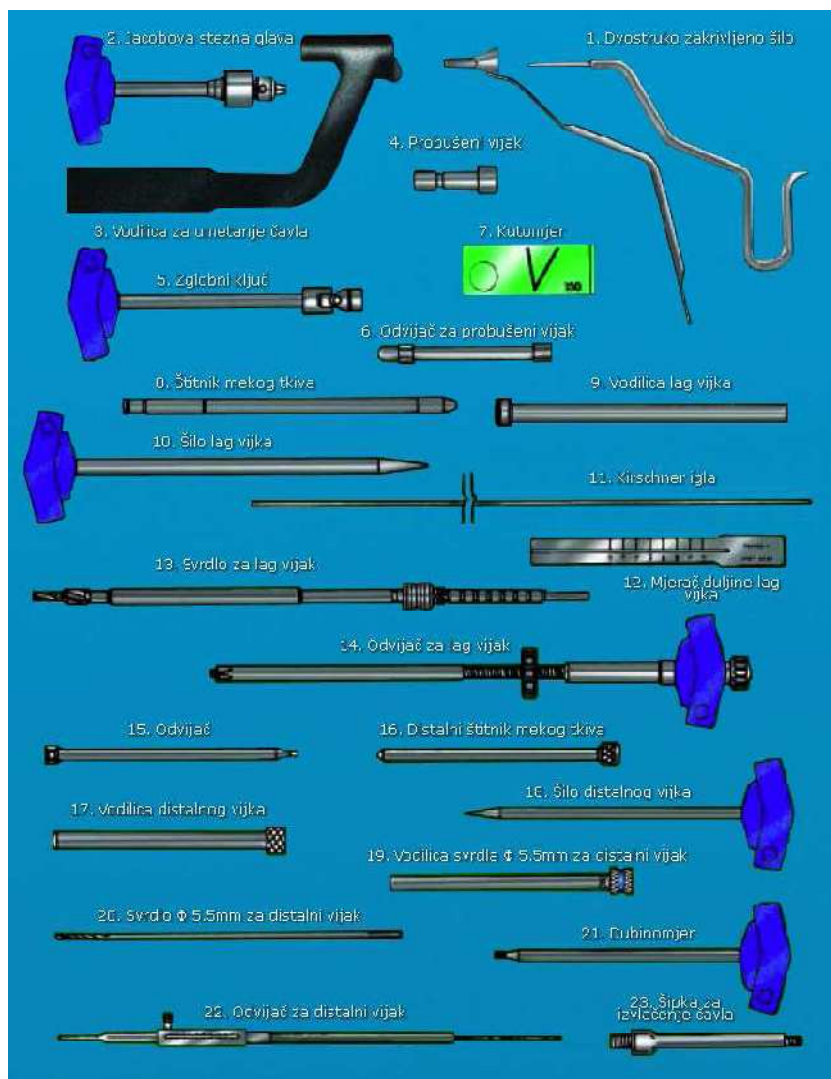
Namještanje prijeloma mora biti postignuto što je više anatomski moguće. Ako nije moguće postići namještanje prijeloma u jednoj ravnini, potrebno je namještanje prijeloma u drugoj ravnini tijekom umetanja gama čavla (implantacije).



Slika 2.8 Prikaz namještanja prijeloma kosti za pojačalo slike [1]

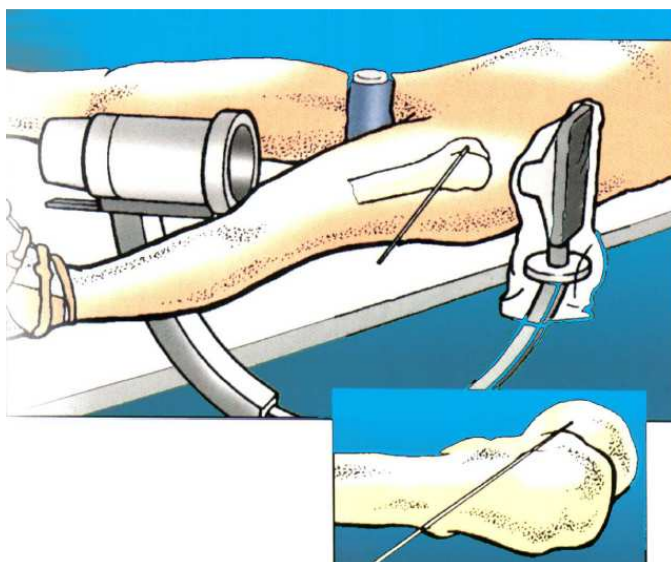
2.3.3 Proširivanje medularne šupljine

Za cijeli proces ugradnje gama čavla koriste se instrumenti (slika 2.9) koji su previđeni za ovaj operativni zahvat.



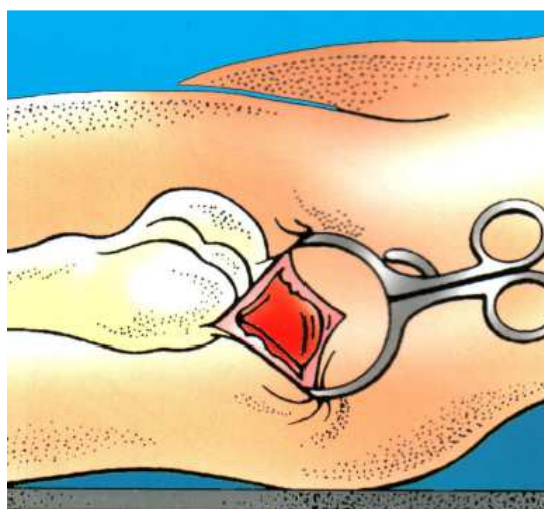
Slika 2.9 Preporučeni specijalni instrumentarij [1]

Pomoću pojačala slike u horizontalnom položaju, da bi dobili lateralni pogled vrata i glave bedrene kosti, uvodi se 2-milimetarska Kirschnerova igla (slika 2.9) kroz kožu s prednje strane bedrene osovine i paralelno s osima vrata i glave bedrene kosti, slika 2.10. Tako se osigurava vođenje prema anteverzijskom kutu, prema vratu bedrene kosti za kasnijeg uvađanja lag vijka, tijekom kojeg se vodilica drži paralelno s Kirschneovom iglom. Druga je mogućnost da Kirschnerova igla bude uvedena nakon što je vodilica lag vijka smještena u njezin položaj.



Slika 2.10 Prikaz umetanja Kirschner igle [1]

Čavao se umeće kroz otvor na velikom trohanteru gdje je potrebno napraviti horizontalan rez kože. Vrh velikog trohantera određuje se palpacijom, a horizontalni rez kože, otprilike 5 cm, velikog trohantera prema zdjeličnom grebenu. Prorez se produbljuje kroz tanku vezivno-tkivnu opnu razrezujući abduktor, otprilike 3 cm, odmah iznad vrha velikog trohantera, tako se izlaže njegov vrh te se postavlja retraktor, slika 2.11.



Slika 2.11 Horizontalni rez kože [1]

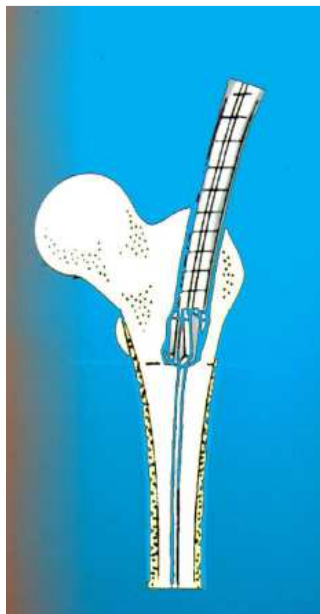
Prije otvaranja korteksa potrebno je odrediti točku ulaza (bušenja). Ispravna točka ulaza određuje se dodiranjem, smještena je na spoju prednje trećine i zadnje dvije trećine vrha velikog trohantera i samog vrha.

Medularni kanal otvara se pod pojačalom slike ako je potrebno. Koristi se dvostruko zakrivljeno šilo (slika 2.9), a njegova konusna vodilica ostavlja se na ulazu u korteks da olakša prolaz vodilice za iglu. Točka ulaza mora biti na vrhu velikog trohantera da čavao prolazi pravilno po osi kako ne bi probio bedrenu kost. Nakon definiranja ulazne točke, pomoću šila se otvori ulaz u medularni kanal, slika 2.12.



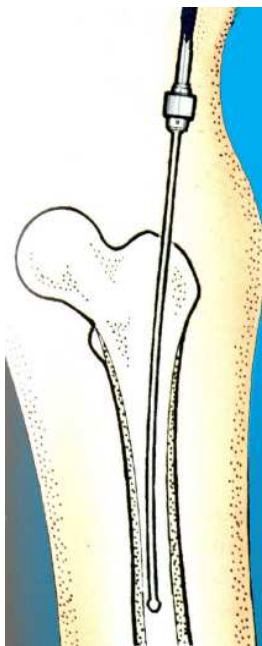
Slika 2.12 Prikaz ulaza šila u kost [1]

Da se čavao smjesti na odgovarajući položaj, trohanterско područje mora se proširiti na 17 mm, slika 2.13, a ostali kanal na 13 mm.



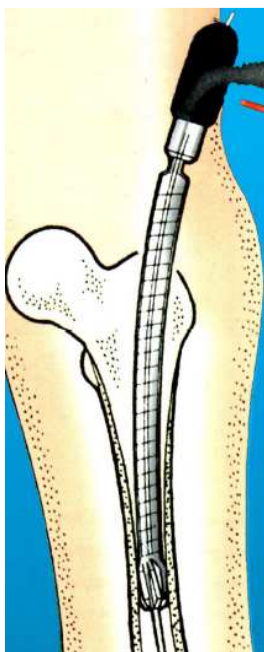
Slika 2.13 Proširivanje trohanterškog područja [1]

Proširivanje se vrši tako da se kroz femoralni kanal spusti vodilica razvrtača pomoću Jacobsove stezne glave (slika 2.9), slika 2.14.



Slika 2.14 Spuštanje vodilice razvrtača [1]

Za razvrtnje šupljine femura koristi se savitljivi razvrtač. Rezanje počinje s promjerom 9 mm pa se promjer povećava za 0.5 mm, slika 2.15, sve do 13 mm.



Slika 2.15 Proširivanje medularne šupljine [1]

2.3.4 Pozicioniranje čavla

Odabrani gama čavao montira se u vodilicu za uvađanje čavla (slika 2.9) prikazanu na slici 2.16. Treba obratiti pozornost da klin na vodilici sjedi u utoru na čavlu te da je pričvršćen pomoću probušenog vijka i pritegnut zglobnim ključem i odvijačem za probušeni vijak.



Slika 2.16 Prikaz montiranja čavla u vodilicu za uvađanje [1]

Umetanje čavla promatra se kroz pojačalo slike. Da bi se osigurao idealan položaj lag vijka, projicirana os lag vijka mora se mjeriti s ravnalom na monitoru. Za osiguravanje ispravnog

smještaja lag vijka, mora se obratiti posebna pozornost na kut anteverzije i na dubinu umetanja čavla u bedreni kanal, slika 2.17.



Slika 2.17 Umetanje čavla [1]

Željeni rezultat je smjestiti vrh lag vijka točno ispod centra femoralne glave u frontalnoj ravnini. To osigurava poravnanje osi provrta za lag vijak sa anteverzijskim kutom vrata bedrene kosti za pravilno odabrani čavao.

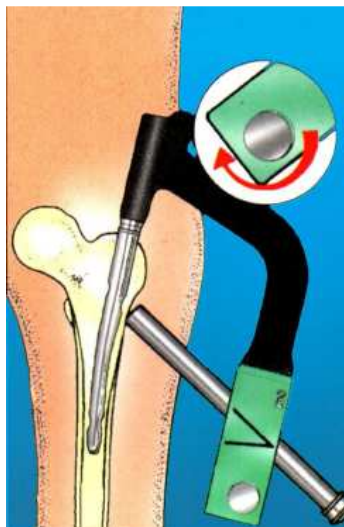
2.3.5 Priprema i ugradnja lag vijka

Usmjeravanje lag vijka vrši se kad se čavao umetne na ispravnu dubinu pomicanjem kutomjera (slika 2.9) tako da se podudara kut izabranog čavla sa krajem vodilice za umetanje lag vijka (slika 2.9), slika 2.18.



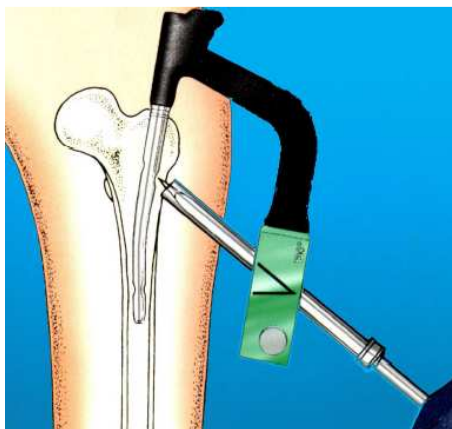
Slika 2.18 Usmjeravanje lag vijka [1]

Nakon usmjeravanja lag vijka potrebno je na kutomjeru fiksirati taj kut (detalj u slici 2.19) i napraviti mali urez na koži, te kroz taj urez provući vodilicu za lag vijak, slika 2.19.



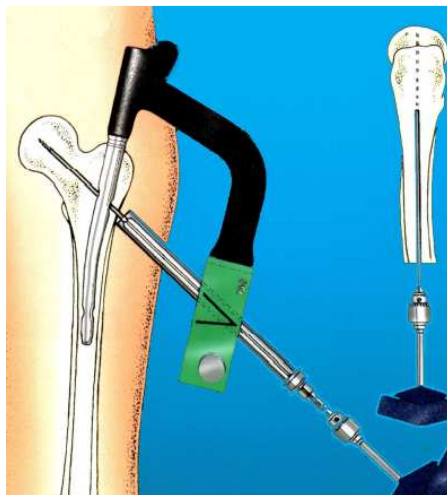
Slika 2.19 Prikaz fiksiranog položaja vodilice lag vijka [1]

U vodilicu lag vijka, čvrsto pritegnutu uz korteks, umetne se šilo lag vijka (slika 2.9) i zaokrene se kako bi se probušio lateralni korteks, slika 2.20, da bi Kirschnerova igla mogla ući unutar vrata bedrene kosti.



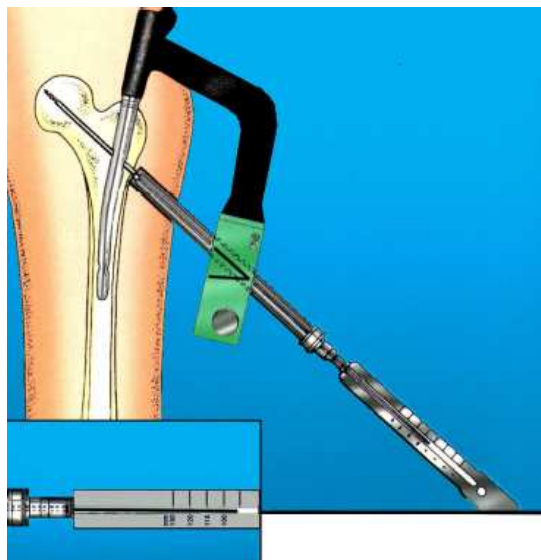
Slika 2.20 Bušenje lateralnog korteksa [1]

Zatim je potrebno pozicionirati Kirschnerovu iglu, uz konstantno promatranje na pojačalu slike, tako da se nalazi ispod centra glave bedrene kosti i centralno u lateralnom pogledu zbog smanjenja rizika od prosijecanja glave bedrene kosti, slika 2.21.



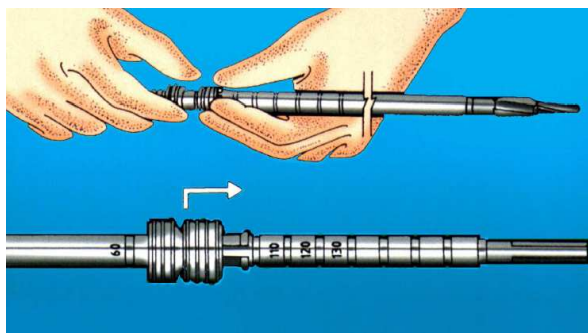
Slika 2.21 Prikaz idealnog položaja Kirschner igle nakon bušenja [1]

Potrebna duljina lag vijka mjeri se pomoću mjerača duljine lag vijka, slika 2.22 (detalj). Mjerač duljine lag vijka (slika 2.9) stavi se izravno pod Kirschnerovu iglu, slika 2.22.



Slika 2.22 Određivanje duljina lag vijka [1]

Izmjera s mjerača duljine lag vijaka prenosi se na podesivi graničnik na svrdlu za lag vijak (slika 2.9), slika 2.23.



Slika 2.23 Podešavanje duljine bušenja [1]

Nakon što je izmjerena duljina lag vijka, svrdlom za lag vijak pomoću Jakobsove stezne (slika 2.9) kroz vodilicu za lag vijak buši se provrt, slika 2.24. Bušenje treba nastaviti sve dok se svrdlo za lag vijak ne zaustavi na vodilici za lag vijak, slika 2.24, gornji detalj.



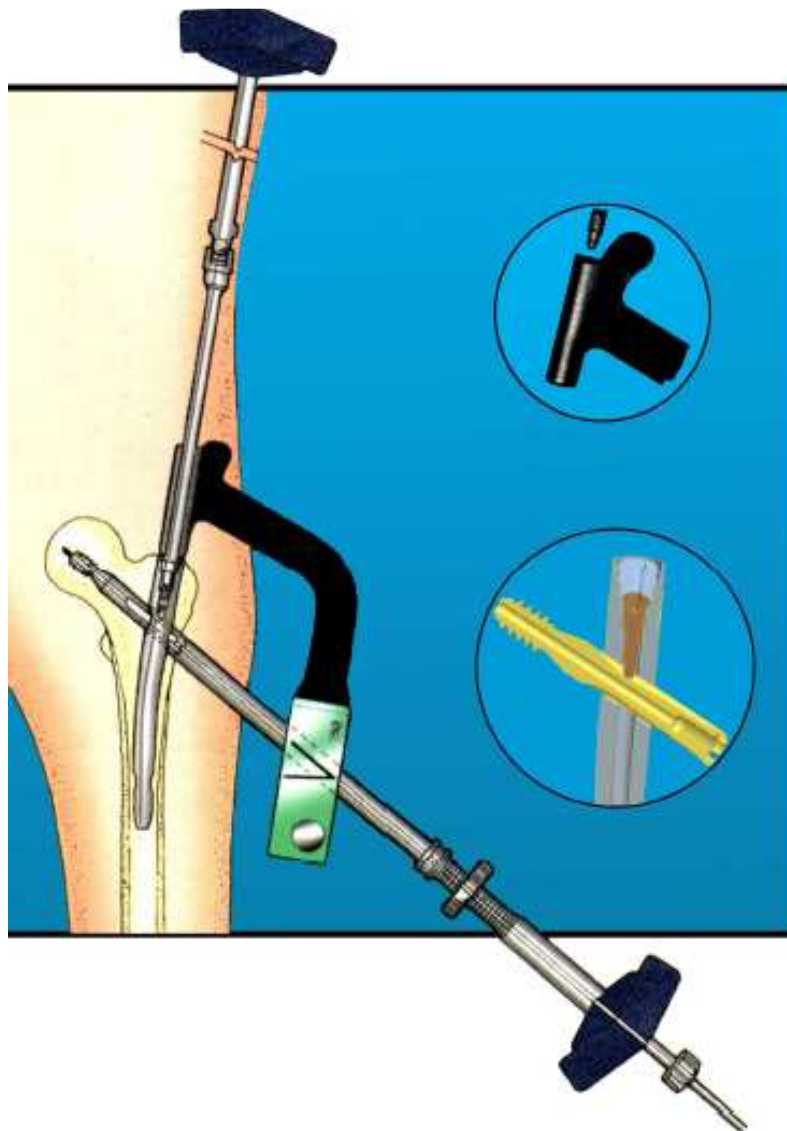
Slika 2.24 Bušenje provrta za lag vijak [1]

Ispravna dužina lag vijka je najmanje 5 mm duža nego što je prethodno izmjereno mjeračem dužine lag vijka, slika 2.22. Bitno je da lag vijak izlazi iz lateralnog korteksa najmanje 5 mm, tako se osigurava njegova rotacijska stabilnost i dopušta mu se klizanje. Lag vijak ispravne dužine se spaja s odvijačem za lag vijak (slika 2.9), slika 2.25. Nakon povezivanja potrebno je stegnuti krajnji kotačić da se osigura povezivanje.



Slika 2.25 Spojeni lag vijak s odvijačem za lag vijak [1]

Lag vijak je potrebno propustiti preko Kirschnerove igle kroz vodilicu za lag vijak i provući do podhrskavičnog dijela glave bedrene kosti. Nakon zatezanja vijka potrebno je osigurati da drška odvijača za lag vijak bude ili paralelna ili okomita na vodilicu za umetanje čavla tako da vijak za zaključavanje sjedne u jedan od 4 žlijeba, slika 2.26, detalj dolje.



Slika 2.26 Fiksiranje lag vijka [1]

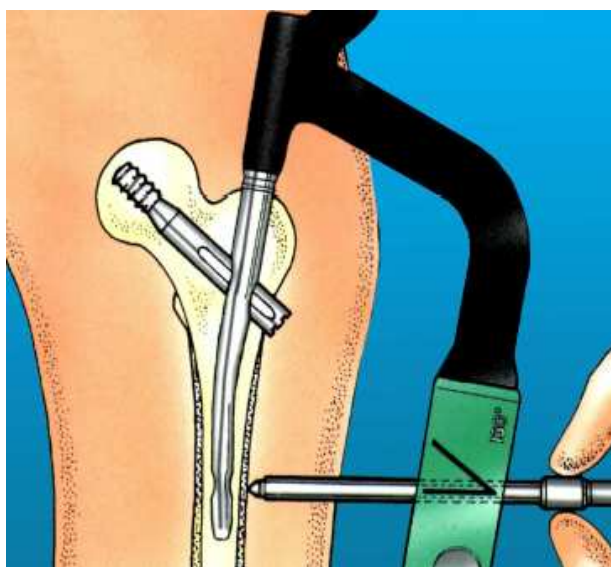
Vijak za zaključavanje umeće se kroz otvor na vodilici za umetanje čavla, slika 2.26 gornji detalj, i stegne se do kraja pomoću odvijača (slika 2.9) i zglobnog ključa (slika 2.9). Zatim se odvine za jednu četvrtinu kruga kako bi se osiguralo slobodno pomicanje lag vijka. Vijak kapa, slika 2.26 detalj dolje, se koristi kako bi se spriječilo srastanje u proksimalnoj glavi čavla i odvijanje vijka za zaključavanje.

2.3.6 Ugradnja distalnog vijka

Odluka o ugradnji distalnog vijka za zaključavanje donosi se ovisno o vrsti prijeloma. Distalni vijak se koristi:

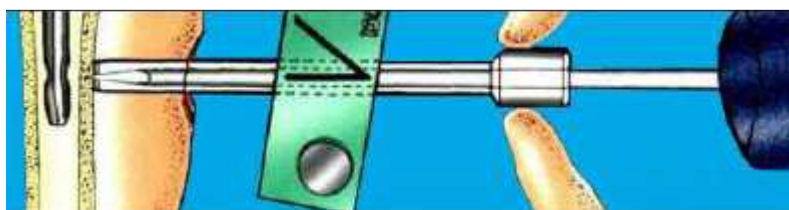
- kada je prijelom nestabilan
- za kontrolu dužine proksimalne femoralne osi kod smrvljene kosti
- kada postoji velika razlika između promjera čavla i femoralne šupljine. [1]

Otpuštanjem kotačića za regulaciju kutomjera pozicionira se mjesto reza. Rez se proširuje dolje prema lateralnom korteksu, a vodilica distalnog vijka (slika 2.9) propusti se do kraja kao što je prikazano na slici 2.27. Vodilica distalnog vijka zablokira se u tom položaju koristeći kotačić za regulaciju kutomjera.



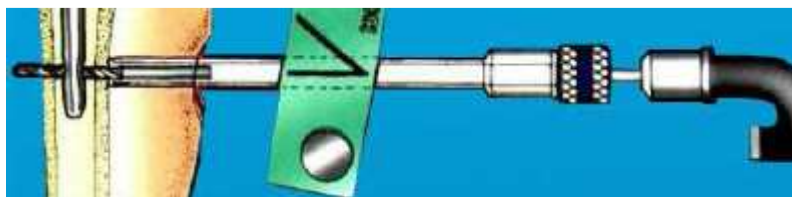
Slika 2.27 Određivanje položaja za ulaz distalnog vijka [1]

Distalno šilo (slika 2.9) propušta se kroz vodilicu distalnog vijka i lagano se zakrene da se napravi mali otisak (oznaka) u bočnom korteksu bedrene kosti (slika 2.28).



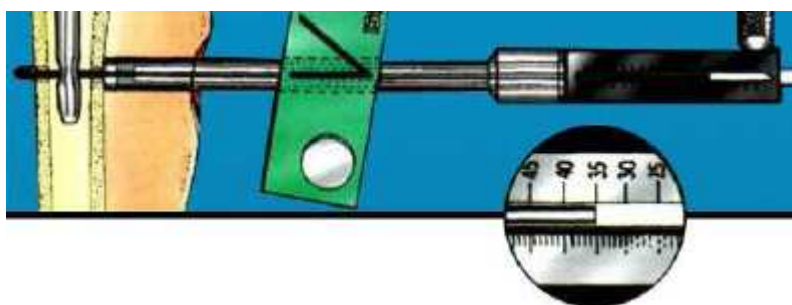
Slika 2.28 Označavanje mjesta bušenja u bočnom korteksu [1]

Za bušenje se koristi svrdlo promjera 5.5 mm (slika 2.9) uzimajući u obzir da je vodilica distalnog vijka tijekom bušenja, čvrsto u kontaktu sa korteksom, slika 2.29.



Slika 2.29 Bušenje bočnog korteksa za distalni vijak [1]

Nakon bušenja, vrši se mjerenje potrebne dužine distalnog vijka pomoću dubinomjera distalnog vijka (slika 2.9). Prvo se uklanja vodilica svrdla za distalni vijak. Dubinomjer se umeće kroz vodilicu distalnog vijka tako da vrhom prolazi do medijalnog korteksa, slika 2.30.



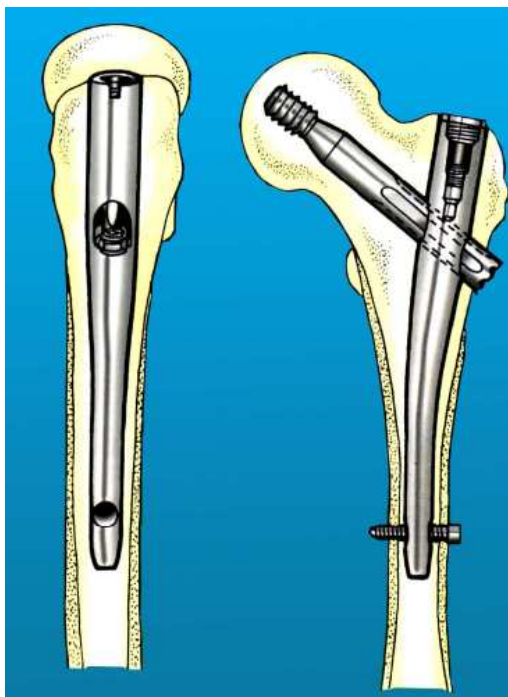
Slika 2.30 Mjerenje dužine distalnog vijka [1]

Izmjerena dužina distalnog vijka se očita direktno na dubinomjeru. Najčešće se koriste vijci dužine 25 i 30 mm. Distalni samorezni vijak ispravne (prethodno izmjerene) dužine se uvodi kroz vodilicu distalnog vijka i pritegne pomoću distalnog odvijača (slika 2.9), slika 2.31.



Slika 2.31 Uvođenje distalnog vijka [1]

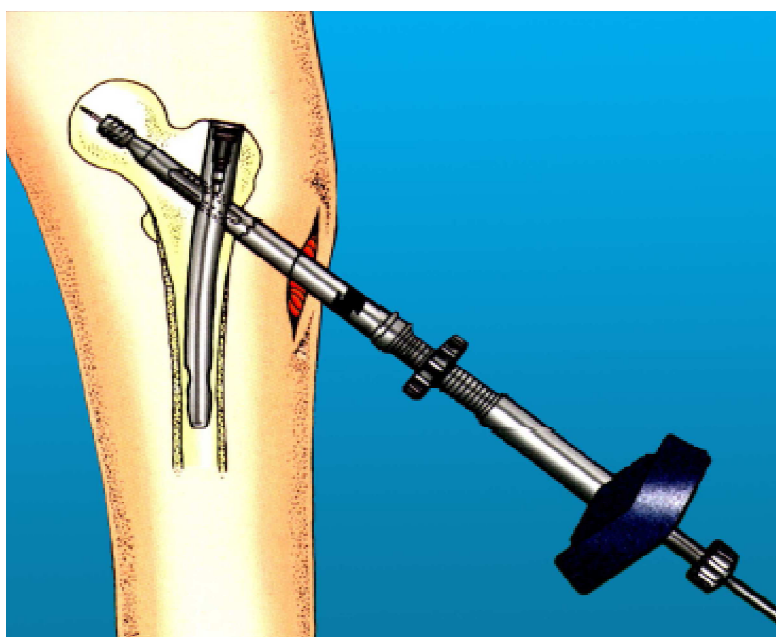
Nakon umetanja vijka vrši se završna provjera tako da se ukloni vodilica distalnog vijka i vodilica za umetanje čavla. Provjerava se konačni položaj implantata koristeći pojačalo slike u prednje–stražnjoj i bočnoj ravnini, slika 2.32. Na kraju se zatvore sve rane.



Slika 2.32 Prikaz ugrađenog gama čavla u prednje-stražnjoj i bočnoj ravnini [1]

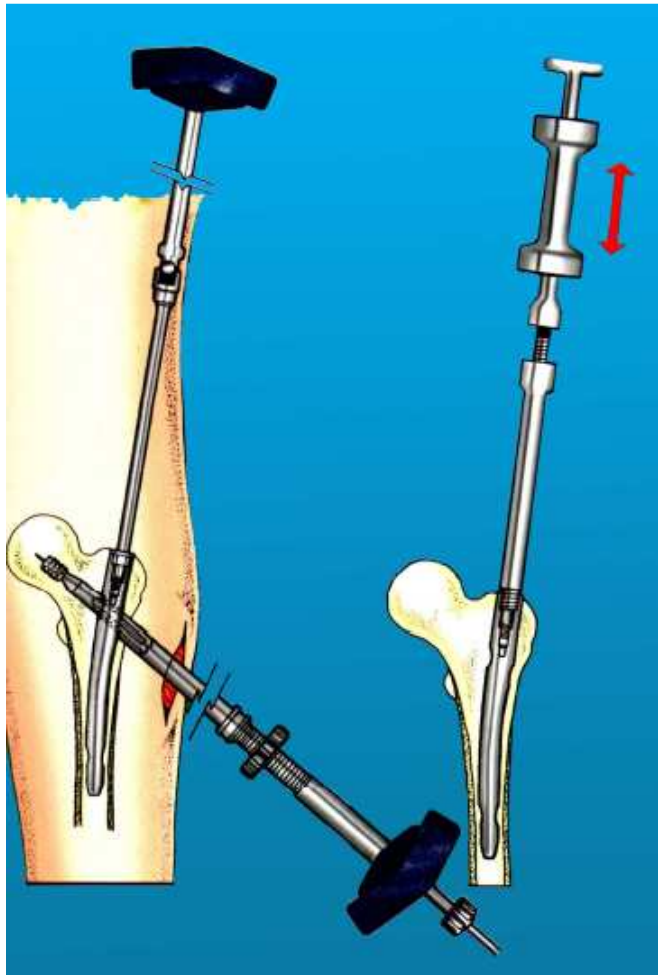
2.4 Vađenje gama čavla [1]

Kod vađenja gama čavla potrebno je prvotno ukloniti distalni vijak ukoliko je ugrađen. Zatim se napravi mali rez kroz stari ožiljak ispod velikog trohantera da se dođe do vanjskog kraja lag vijka. Ukloni se bilo koji izrast kosti, koji bi mogao smetati vanjskom kraju ili unutarnjem pomaku lag vijka, kako bi se osigurala dobra veza s odvijačem za lag vijak, slika 2.33.



Slika 2.33 Povezivanje odvijača s lag vijkom [1]

Zatim se napravi rez preko proksimalnog vrha čavla, ukloni se vijak kapa te se odvijač spoji s vijkom za zaključavanje. Zglobnim ključem (slika 2.9) okrene se vijak suprotno od kazaljke na satu tako da se oslobodi od lag vijka, slika 2.34 lijevo. Vijak za zaključavanje ne mora se potpuno izvaditi.



Slika 2.34 Uklanjanje vijak kape i odvijanje vijka za zaključavanje [1]

Nakon što je vijak za zaključavanje odkočen, lag vijak se izvadi okretanjem odvijača za lag vijak u smjeru suprotnom od kazaljke na satu.

Šipka za izvlačenje čavla (slika 2.9) uvine se u proksimalni kraj čavla, slika 2.35 desno, pričvrsti se klizni čekić te izvadi gama čavao. Na kraju se zatvore sve rane.

3. STANDARDNE SPECIFIKACIJE I ISPITNE METODE ZA KUTNE METALNE IMPLANTATE PREMA NORMI ASTM F384–06 [4]

3.1 Domena

Ova norma odnosi se na kutne implantate koji se koriste u kirurško-internom učvršćivanju koštanog sustava, a određuje metode za klasificiranje i definiranje geometrijskih i uporabnih karakteristika takvih uređaja. Normom su zadane standardne specifikacije kojima se određuje materijal, označavanje, eksploatacijski zahtjevi i metode testiranja za mjerenje karakteristika u odnosu na mehanička svojstva koja su određena kao važna za životni vijek.

Namjera ove norme nije da definira spektar mogućnosti pojedinog slučaja korištenja implantata zato što je znanje dostupno za predviđanje posljedica uporabe pojedinih pacijenata u situacijama dnevnih životnih radnji nedovoljno da bi se odredile posljedice uporabe. Ova norma ne opisuje ili specificira pojedini implantat korišten u kirurškom internom učvršćivanju koštanog sustava.

Norma uključuje dvije testne metode u određivanju mehaničkih svojstava implantata:

1. Standardna ispitna metoda za statičko tlačno savijanje metalnog kutnog implantata za učvršćivanje prijeloma.
2. Standardna ispitna metoda za određivanje savojnih zamornih svojstava metalnog kutnog implantata za učvršćivanje prijeloma.

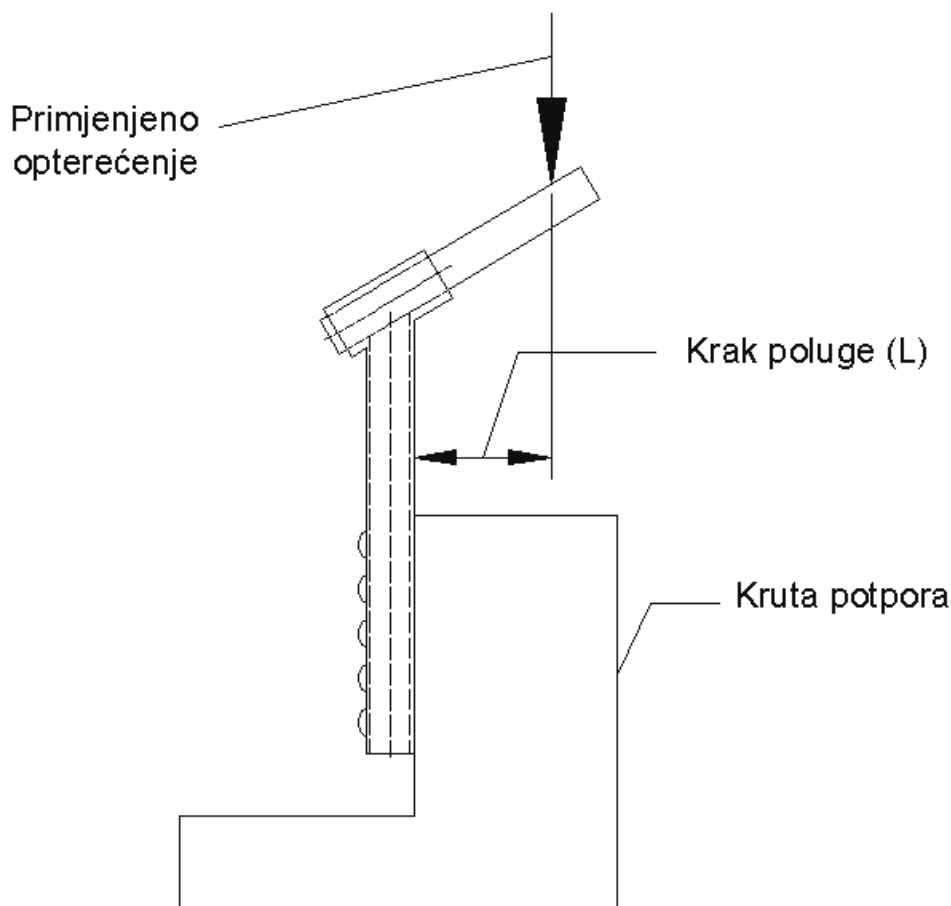
Prema normi sve jedinice korištene u ispitivanju moraju biti u SI sustavu. [4]

3.2 Princip standardne ispitne metode za statičko tlačno savijanje metalnog kutnog uređaja

Ovom ispitnom metodom određuju se strukturalna svojstva metalnog kutnog implantata, savojna čvrstoća, savojna krutost i dopušteno opterećenje. Ispitna metoda namijenjena je osiguranju sredstva za određivanje mehaničkih svojstava različitih kutnih implantata. Nije namijenjena da definira spektar mogućnosti implantata zato jer su ta svojstva određena specifičnim kliničkim zahtjevima pojedinog pacijenta. Ova testna metoda napravljena je da omogućuje različitu definiranost ispitivanja tako da se cijeli niz kliničkih kolapsa može promatrati. [4]

3.2.1 Sažetak testne metode

Kutni implantat, koji je podvrgnut ispitivanju, ukliješten je s prihvatom, kruta potpora na slici 4.1. Lag vijak se montira tako da duljina kraka poluge bude jednaka 80% duljine lag vijka. Na kraju lag vijka djeluje tlačno opterećenje brzinom 10 mm/min. Opterećenje se primjenjuje sve dok ne dođe do vidljive plastične deformacije ili do loma uzorka.



Slika 3.1 Prikaz testne konfiguracije

3.2.2 Važnost i upotreba

Ovaj savojni test je korišten za određivanje vrijednosti za mehanički odziv kutnog implantata za specifični tip savojnog opterećenja. Rezultirajuće informacije mogu kirurgu dati neki uvid u mehanički odziv danog kutnog implantata.

Kako se opterećenje kutnog implantata na konkretno ugrađenom mjestu kod pacijenta razlikuje od ovdje opisanog opterećenja korištenog na ovom mjestu, rezultati dobiveni pomoću ovog testa ne mogu direktno biti upotrijebljeni za predviđanje ponašanja u dnevnoj uporabi.

Podaci o mehaničkim svojstvima mogu biti korišteni za provođenje relativnih usporedbi drugačijih kutnih implantata.

3.2.3 Procedura ispitne metode

1. Montirati lag vijak na čavao i pozicionirati ga tako da opterećenje djeluje u točki u kojoj će duljina kraka poluge biti ekvivalentna 80% duljini lag vijka. Zatim pomoću vijka za zaključavanje fiksirati taj položaj. Nakon toga montirati vijak kapu koji će spriječiti odvrtnje vijka za zaključavanje i time onemogućiti pomicanje lag vijka.

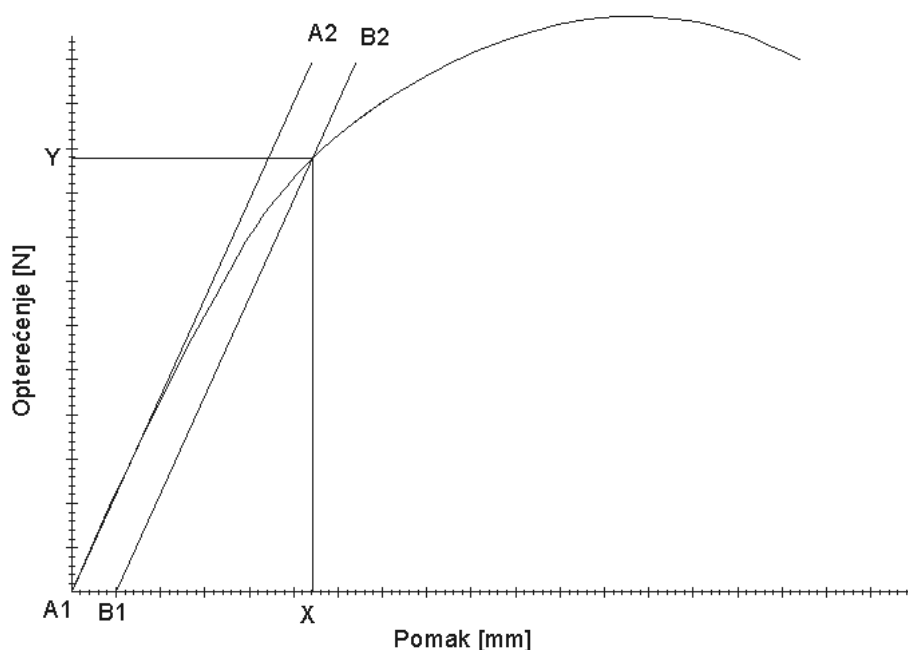
2. Montirati kutni implantat na krutu potporu tako da primijenjeno opterećenje djeluje samo paralelno na dulju os čavla.

3. Primijeniti opterećenje s povećanjem magnitude na kutni uređaj s kontroliranom brzinom pomaka od 10 mm/min.

4. Generirati dijagram opterećenje-pomak s time da se kontrolira pomak tijekom ispitivanja. Ponašanje deformacija poslije granice tečenja može biti različito od ponašanja opterećenja uslijed nelinearnih pomaka.

5. Na dijagramu opterećenje-pomak nacrtati pravac koja najbolje aproksimira početni (linearni) dio dijagrama.

6. Odrediti tlačnu savojnu krutost uzorka izračunavanjem nagiba pravca A1,A2 (slika 4.2).



Slika 3.2 Dijagram opterećenje/pomak

7. Izračunati 0,2% deformacije (q) iz jednadžbe $q=0,002 \cdot L$ gdje je L krak poluge, slika 4.1.

8. Na opterećenje-pomak dijagramu označiti točku B1 koja se nalazi na q udaljenosti od točke A1 na osi x , te povući pravac kroz točku B1 koji je paralelan s pravcem A1A2.

9. Na sjecištu pravca B1B2 s krivuljom tečenja očitati dopušteno opterećenje Y .

10. Izračunati tlačnu savojnu čvrstoću pomoću izraza $Y \cdot L$ gdje je Y dozvoljeno opterećenje, a L duljina kraka poluge.

11. Ako kutni uređaj doživi lom prije presjecišta opterećenje-pomak krivulje i pravca B1B2, izračunati tlačnu savojnu izdržljivost iz $F_{max} \cdot L$, gdje je F_{max} opterećenje pri lomu.

3.3 Princip standardne ispitne metode za određivanje savojnih zamornih svojstava metalnog kutnog implantata

Ova testna metoda provodi se u svrhu određivanja svojstava zamora materijala uslijed cikličkog savijanja kutnog implantata. Testna metoda može biti korištena za određivanje vijeka trajanja koristeći specifični ili različite maksimalne savojne momente za određeni broj ciklusa. Namjera ove testne metode je osigurati mehanička svojstva različitih načina izvedbe kutnih implantata. Ova metoda ne definira spektar mogućnosti kutnih uređaja pošto su ove karakteristike određene sa specifičnim kliničkim zahtjevima.

3.3.1 Sažetak testne metode

Kutni implantat koji je podvrgnut testu je smješten i sklopljen isto kao i testu statičkog tlačnog savijanja, slika 4.1. Kutni uređaj je podvrgnut konstantnom sinusoidalnom cikličkom momentu savijanja. Zamorno opterećenje je kontinuirano sve dok uzorak ne doživi kolaps ili ne izdrži zadani broj ciklusa.

3.3.2 Važnost i upotreba

Norma predstavlja uniformno konzolno savojno zamorno ispitivanje tako da opiše i uspoređi zamorne mogućnosti različitih implantata. Ispitna metoda može biti iskorištena za određivanje životnog vijeka uređaja određenim specifičnim maksimalnim momentom savijanja ili na spektru različitih maksimalnih momenata savijanja. Osim toga ova metoda može biti korištena da se predvidi zamorna čvrstoća za specifični broj ciklusa.

Ova ispitna metoda primjenjuje pojednostavljen model konzolnog savijanja koji može sasvim točno opisati primijenjeno opterećenje koje se javlja kod pacijenta. Rezultati testa

dobiveni ovom metodom ne mogu biti direktno korišteni za provođenje usporedbi s drugačijim izvedbama kutnih implantata.

Normom se podrazumijeva da se materijal kutnog implantata nalazi samo u linearno-elastičnom području, stoga ova metoda nije prikladna za materijale koji ne posjeduju linearno-elastično područje.

Ova ispitna metoda je ograničena na ispitivanje u linearno-elastičnom području materijala kutnog implantata, stoga nije prikladna za testiranje materijala koji se približava ili prelazi u plastično područje.

3.3.3 Testni uzorci

Sve komponente ispitivanja trebaju reprezentativno opisati kvalitetu implantata odnoseći se naravno na kvalitetu materijala, obradu površine, označavanje i tehnologiju proizvodnje. Bilo kakva devijacija od ovog zahtjeva mora biti zapisana u konačnom izvještaju.

Kutni implantati koji su bili korišteni u eksploatacijskim uvjetima ili preoblikovani za ugradnju nisu odgovarajući za ovu normu i neće biti ispitivani jer rezultati ispitivanja takvih uzoraka neće davati vjerodostojne podatke o njihovim svojstvima.

Kutni implantati različitih duljina, ali nominalno identičnog uzdužnog dijela, napravljeni od istog materijala, mogu biti iskorišteni kao uzorak.

3.3.4 Procedura ispitivanja

1. Prije provedbe ispitivanja moraju biti određeni spektri savojnog momenta kojim se ispituje uzorak. Za razmatranje zamornih karakteristika kutnog uređaja korisnik ima na raspolaganju više metoda čiji odabir je baziran na željenim rezultatima studije.

1.1. M-N (moment-ciklusi) metoda – korisnik može testirati dani kutni uređaj različitim maksimalnim savojnim momentima kako bi opisao generalni trend zamornog ponašanja kutnog implantata. Iskustvo ispitivača je najbolji način na koji se mogu odrediti početni uvjeti opterećenja. U odsutnosti takvog iskustva, preporuka je da se koristi početno zamorno opterećenje koje odgovara 75, 50 i 25% savojne čvrstoće određene statičkim testom. Ovisnost narinutog momenta o broju ciklusa prikazuje se na semilogaritamskom M-N dijagramu čija krivulja mora biti pravilno provučena kroz dobivene podatke.

1.2. Metoda određivanja zamorne izdržljivosti – implantat se također može ispitivati na način da se odredi zamorna izdržljivost za određen broj ciklusa. Ova metoda preporučuje da se zamorna izdržljivost odredi opterećenjem na milijun ciklusa. Maksimalna razlika između

opterećenja korištenog u svrhu određivanja zamorne izdržljivosti ne smije biti 10% veća od dopuštenog opterećenja određenog statičkim ispitivanjem.

2. Potrebno je učvrstiti kutni implantat tako da bude konzistentno opterećen na način da opisuje istraživani klinički kolaps.

3. Narinuto opterećenje prenosi se na implantat tako da djeluje paralelno s duljom osi čavla kao i u statičkom ispitivanju

4. Tijekom ispitivanja kontrolira se sila koja je sinusoidalnog oblika. Izlazni odziv na ispitnom implantatu daje ciklički savojni moment sinusnog karaktera. Potrebno je odabrati frekvenciju cikličkog opterećenja uzorka koja neće uzrokovati osjetne deformacije u materijalu implantata. Uobičajeno se koristi frekvencija od 5 Hz koja se smatra prihvatljiva u smislu vremenskog trajanja ispitivanja, a također neće promijeniti svojstva materijala uzorka.

5. Preporučeni omjer minimalne i maksimalne vrijednosti opterećenja zamornog ciklusa je 0.1. Bilo kakve devijacije od ovog zahtjeva moraju biti navedene u konačnom izvještaju te moraju biti opravdane.

6. Brojač ciklusa treba kumulativno snimati broj ciklusa opterećenja narinutih na uzorak, dok odgovarajuće granice moraju biti postavljene tako da pokazuju grešku ili devijacije predviđenog opterećenja.

7. Ispitivanje se provodi dok uzorak ne pukne ili se ne postigne postavljena granica za koju se predviđa da će prekinuti ispitivanje ili dok se ne zadovolji vremenski kriterij trajanja ispitivanja.

Kao rezultat ovog ispitivanja treba navesti:

- Proizvođača uzorka kutnog uređaja,
- Opis i kataloški broj kutnog uređaja,
- Materijal kutnog uređaja,
- Devijacije u odnosu na normalni implantat,
- Neopterećenu duljinu kraka poluge (L),
- Omjer minimalne i maksimalne vrijednosti parametra opterećivanja zamornog ciklusa,
- Frekvenciju ispitivanja,
- Opis uvjeta okoline gdje se provodi ispitivanje,
- Devijacije u odnosu na preporučene testne metode,
- Tablični izvještaj koji sadržava maksimalni moment i rezultirajuće podatke do zadanog ciklusa.

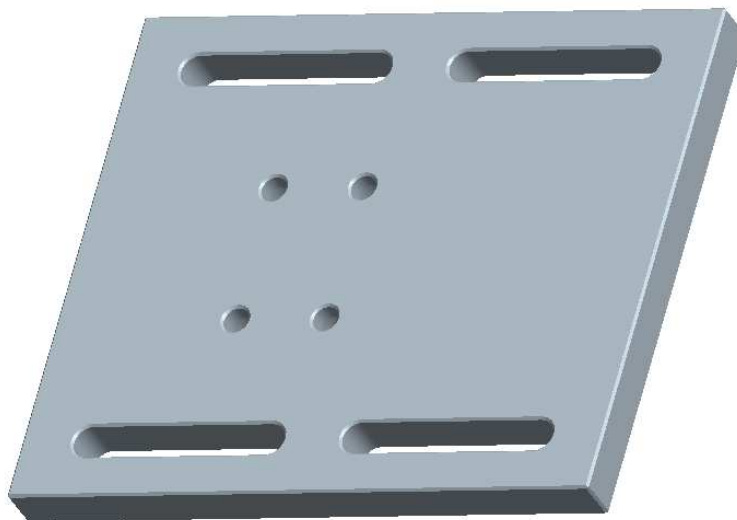
4. PROVEDBA EKSPERIMENATA

Ispitivanje gama čavla podijeljeno je na pripremu i provedbu statičkog i dinamičkog eksperimenta. U dio pripreme pripadaju svi potrebni postupci od zaprimanja uzorka pa do trenutka kada je ispitni uzorak spreman da ga se može pravilno postaviti na statičku, odnosno dinamičku kidalicu i podvrgnuti opterećenju. Pod provedbom eksperimenta podrazumijeva se definiranje parametara ispitivanja, te praćenje i kontroliranje opterećenja gama čavla tijekom ispitivanja.

4.1 Priprema gama čavla za statički i dinamički test

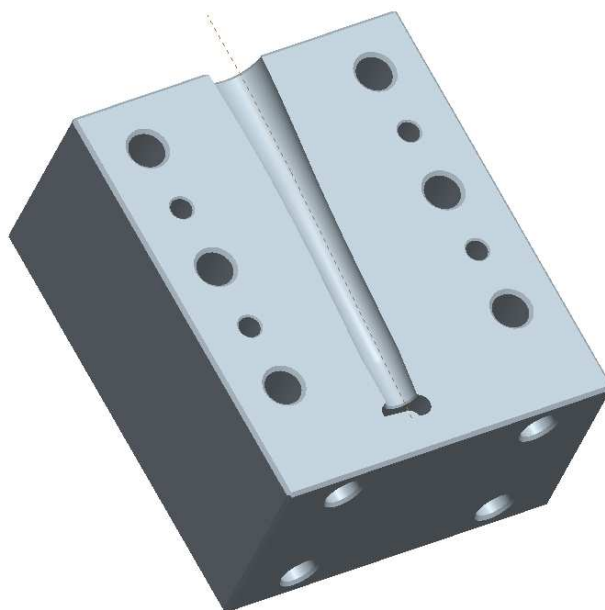
Priprema ispitivanja gama čavla započinje izradom dijelova koji su neophodni za provedbu eksperimenta. Zahtjevi ispitivanja te dizajn radnog stola kidalice uvjetovali su konstrukcijsko rješenje izrade prihvata za vrijeme ispitivanja. Konstrukcija i dizajn traženog dijela napravljen je u 3D programskom paketu ProEngineer u kojem je izvršeno i optimiranje dimenzija s obzirom na veličinu uzorka te same dinamičke kidalice.

Postolje prihvata (slika 4.1) ima 4 utora koji omogućuju planarno gibanje s ciljem pozicioniranja prihvata, a time i gama čavla koji se opterećuje. Postolje ima 4 provrta Ø11 mm na koje se pomoću 4 vijka M10 pričvršćuje dio u koji se postavlja čavao (slika 4.2).



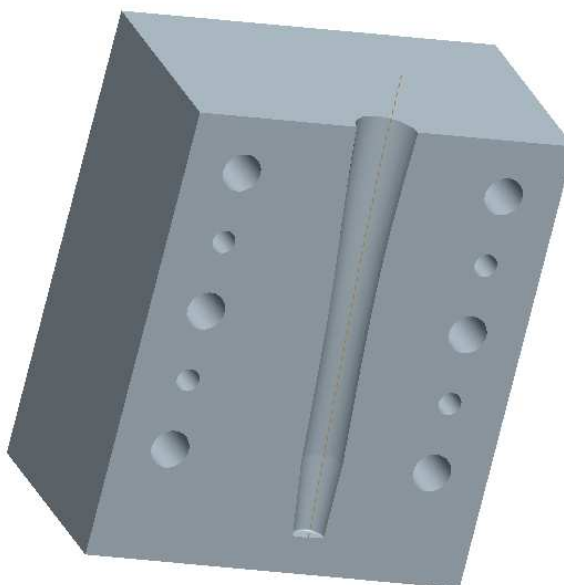
Slika 4.1 CAD model postolja prihvata gama čavla

Prihvat koji se učvršćuje na postolje ima 6 provrta s navojem M10 pomoću kojih se ostvaruje stezni spoj gama čavla, a time i uklještenje definirano u normi. Između provrta s navojima nalaze se 4 provrta Ø6 mm u koje se postavljaju 4 vodilice istog promjera.



Slika 4.2 CAD model prihvata koji se pričvršćuje na postolje

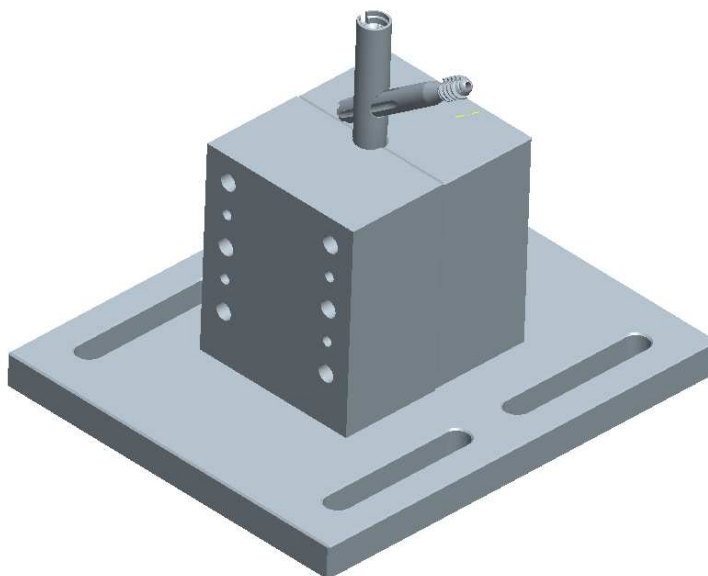
Drugi dio prihvata (slika 4.3.) također ima 6 provrta Ø11 i iste provrte za vodilice. U oba dijela prihvata urezan je profil čavla. Montaža dijelova prihvata je pomoću vodilica, a pritezanjem vijaka se ostvaruje stezni spoj.



Slika 4.3 CAD model pomičnog dijela prihvata

Dva zaprimljena uzorka gama čavla bili su istih dimenzija, duljina lag vijka bila je 100 mm, provrt na čavlu je pod 130°, a duljina čavla iznosi 180 mm. Lag vijak je montiran na čavao kako propisuje norma i pritegnut je s vijkom za zaključavanje. Vijak kapa je pritegnut u svrhu osiguranja vijka za zaključavanje od odvrtanja.

Konstrukcijom prihvata prema slici 4.4 osigurani su uvjeti opterećivanja gama čavla prema zahtjevu norme, odnosno da pravac djelovanja opterećenja tijekom ispitivanja mora biti paralelan s duljom osi čavla.



Slika 4.4 CAD model prihvata gama čavla

Nakon fiksiranja čavla u prihvat započinje konačno pozicioniranje uzorka na radnom stolu. Kada se postigne položaj u kojem će opterećenje djelovati na kraju vijka, postolje se steže za stol kidalice (slika 4.5). Ovim postupkom gama čavao je spreman za provedbu eksperimenta.



Slika 4.5 Položaj postolja za provedbu eksperimenta

4.2 Provedba statičkog ispitivanja

Savojna svojstva (savojna krutost i savojna čvrstoća) gama čavla ispitana su na servohidrauličkoj kidalici LFV 50-HH, Walter+Bai Švicarska (slika 4.6).



Slika 4.6 Servohidraulička kidalica LFV 50-HH, Walter+Bai

Parametri opterećenja gama čavla definirani su u normi ASTM F 384-06, a potrebno je bilo napraviti programski kod u softveru dinamičke kidalice Dion-Pro koji simulira statičko opterećenje. Statičko opterećenje kojim se djelovalo na lag vijak gama čavla je definirano u normi, a brzina deformiranja, odnosno brzina s kojom je opterećivan lag vijak iznosila je 10 mm/min. Ispitivanje traje dok ne dođe do vidljive plastične deformacije ili do loma uzorka. Programski kod nalazi se u prilogu.

Nakon programiranja i prethodnog pozicioniranja ispitnog uzorka na stolu (slika 4.7), slijedi pokretanje programa za statičko ispitivanje savojnih svojstava gama čavla. Svrha provedbe statičkog ispitivanja je dobivanje savojne čvrstoće, savojne krutosti i dopuštenog opterećenja gama čavla.



Slika 4.7 Pozicionirani uzorak za statički eksperiment

Nakon što je nastupila vidljiva plastična deformacija ispitivanje je obustavljeno. Nije došlo do loma uzorka zbog visoke duktilnosti materijala, ali je nastala velika plastična deformacija (slika 4.8).



Slika 4.8 Deformacija gama čavla nakon statičkog ispitivanja

4.3 Provedba dinamičkog ispitivanja

Parametri opterećenja gama čavla definirani su u normi ASTM F 384-06, a potrebno je bilo napraviti programski kod u softveru dinamičke kidalice Dion-Pro koji simulira dinamičko opterećenje. Dinamičko opterećenje kojim se djelovalo na uzorak ima oblik sinusoide, s vršnim vrijednosti od 93,75 N do 937,5 N, a frekvencija je iznosila 5 Hz. Maksimalno opterećenje pri dinamičkom ispitivanju iznosilo je 75% vrijednosti dozvoljene sile dobivene statičkim ispitivanjem. Vrijeme ispitivanja određeno je brojem ciklusa, a u ovom ispitivanju je trajalo do 10^6 ciklusa. Programski kod nalazi se u prilogu.

Nakon programiranja i prethodno pozicioniranja ispitnog uzorka (slika 4.9) na stolu slijedi pokretanje programa za cikličko ispitivanje dinamičke izdržljivosti gama čavla. Odabrana frekvencija od 5 Hz davala je pravilan oblik sinusoide s relativno dobrim vršnim vrijednostima zadanih sila. Ispitivanje 10^6 ciklusa, pri frekvenciji od 5 Hz traje oko 55 sati ako ne nastupi jedan od uvjeta (vidi poglavlje 4.3.4). zbog kojih se prekida ispitivanje.

Tijekom probnog ispitivanja vrh vijka je opterećivan pomoću ravne kružne ploče. Uz takav način opterećivanja kidalica nije mogla postići zadano sinusoidalno opterećenje od 937,5 N s frekvencijom od 5 Hz. Razlog odstupanja sile od zadanog oblika i maksimalne vrijednosti je trenje koje se zbog velikog progiba lag vijka pojavilo između navoja vijka i metalne ploče preko koje se sila prenosila na lag vijak. Ovakvim načinom opterećivanja ne samo da nije postignuta potrebna sila, već nije zadovoljen ni uvjet da opterećenje mora djelovati paralelno s uzdužnom osi čavla. Stoga je na kraj lag vijka postavljena kugla, a opterećivanje je izvedeno preko ležaja s mogućnošću radijalnog pomaka, slika 4.9. Na taj je način izbjegnuto trenje i osigurano je opterećenje vertikalnom silom prema zahtjevu norme.



Slika 4.9 Pozicionirani uzorak za dinamičko ispitivanje

Nakon ispitivanja s 10^6 ciklusa, uzorak je izvađen iz prihvata i pregledan da li su se pojavila kakva oštećenja na uzorku.

Iz slike 4.10 je vidljivo da tijekom ispitivanja nisu nastupila nikakva oštećenja, te se može zaključiti da gama čavao pri ispitivanju s 10^6 ciklusa s opterećenjem do 937,5 N i uz frekvenciju od 5 Hz ima zadovoljavajuću dinamičku izdržljivost.

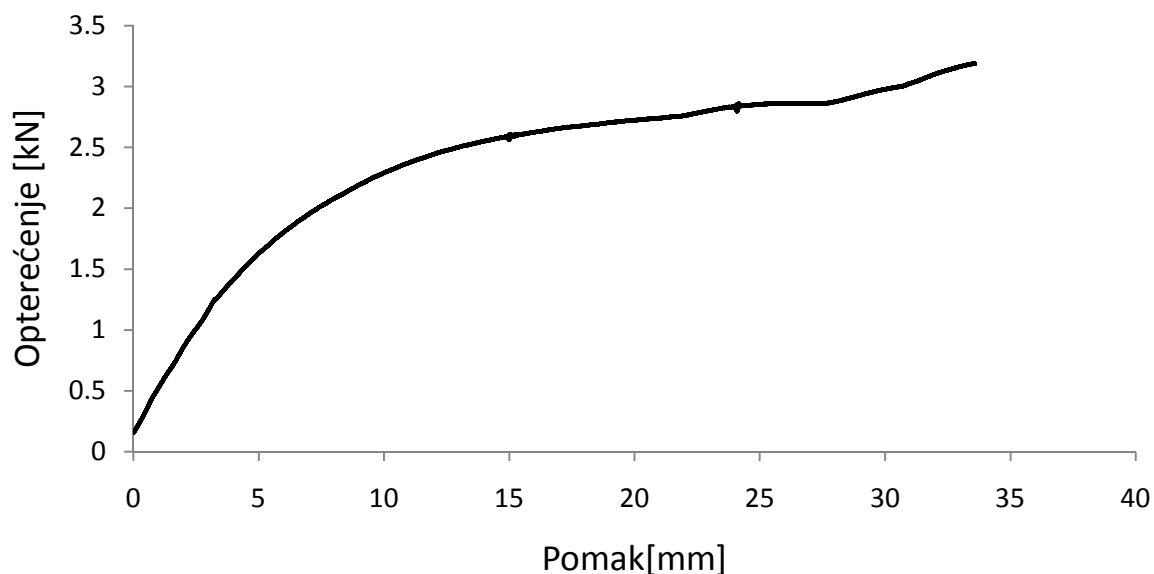


Slika 4.10 Gama čavao nakon dinamičkog eksperimenta

5. REZULTATI ISPITIVANJA

5.1 Rezultati statičkog eksperimenta

Na osnovu podataka o pomaku i opterećenju dobiven je dijagram opterećenje-pomak, slika 5.1.



Slika 5.1 Dijagram opterećenje-pomak pri statičkom ispitivanju

Iz dijagrama opterećenje-pomak načinom, kojim nalaže norma (vidi poglavlje 4.2.3), dobiveni su rezultati prikazani u tablici 5.1.

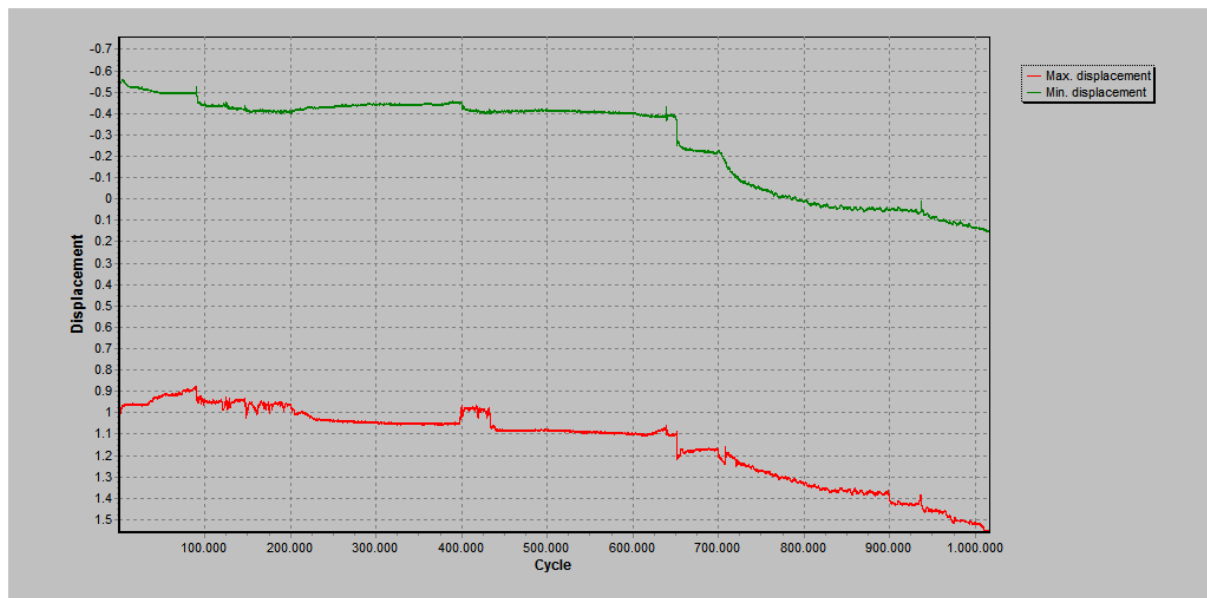
Tablica 5.1 Rezultati statičkog ispitivanja

<i>0.2 % deformacije ($q=0.002 \cdot L$):</i>	0.136 mm
<i>Dopušteno opterećenje (Y):</i>	1.25 kN
<i>Tlačna savojna krutost:</i>	61.54 N/m
<i>Tlačna savojna čvrstoća ($Y \cdot L$):</i>	85 Nm

Duljina neopterećenog kraka (L) poluge izosila je 68 mm.

5.2 Rezultati dinamičkog eksperimenta

Izdržljivosti gama čavla definira se dijagramom pomak-ciklusi, slika 5.2. U prvih $2 \cdot 10^5$ ciklusa dolazi do blagih oscilacija pomaka. Poslije $6 \cdot 10^5$ ciklusa dolazi do nagle propagacije pomaka koja je prisutna do kraja eksperimenta. Na dijagramu su iscrtane dvije krivulje: zelena i crvena. Zelena krivulja označava donje vršne vrijednosti, a crvena gornje vršne vrijednosti pomaka tijekom narinutog opterećenja.



Slika 5.2 Dijagram pomak-ciklus

Vrijednosti izmjerenih pomaka nakon ispitivanja imaju negativan predznak, zbog tlačnog dinamičkog opterećenja uzorka i prikazani su u tablici 5.2.

Tablica 5.2 Očitane vrijednosti pomaka

Pomak [mm]	$1 \cdot 10^5$ cikl.	$2 \cdot 10^5$ cikl.	$3 \cdot 10^5$ cikl.	$4 \cdot 10^5$ cikl.	$5 \cdot 10^5$ cikl.	$6 \cdot 10^5$ cikl.	$7 \cdot 10^5$ cikl.	$8 \cdot 10^5$ cikl.	$9 \cdot 10^5$ cikl.	10^6 cikl.
S_{\min}	-0.439	-0.405	-0.442	-0.421	-0.420	-0.400	-0.223	0.016	0.048	0.136
S_{\max}	0.949	0.966	1.045	1.002	1.083	1.095	1.207	1.333	1.407	1.513

6. NUMERIČKO MODELIRANJE POMAKA GAMA ČAVLA

6.1 Metoda konačnih elemenata [5]

Metoda konačnih elemenata numerička je metoda nezaobilazna u inženjerskim proračunima. Danas postoji velik broj računalnih programa temeljenih na ovoj metodi koji omogućuju analizu konstrukcija bez razmatranja složene teorije koja opisuje fizikalno ponašanje konstrukcije. Budući da je metoda konačnih elemenata numerička metoda, sva dobivena rješenja su približna, odnosno realnim vrijednostima može se samo približiti uz pravilan odabir proračunskog modela i uz pravilno odabrane tipove konačnih elemenata. Zbog toga je naročito važno poznavati fizikalno ponašanje konstrukcije koja se analizira te poznavati teorijske osnove konačnih elemenata. [5]

Ova metoda temelji se na diskretizaciji kontinuuma, odnosno područje kontinuuma se dijeli na konačan broj potpodručja koja se nazivaju konačni elementi. Dakle, promatrani kontinuum postaje mreža konačnih elemenata. Elementi su međusobno povezani točkama koje nazivamo čvorovima, a stanje u svakom elementu (pomaci, deformacije, naprezanja, temperatura itd.) opisano je interpolacijskim funkcijama koje moraju zadovoljavati određene uvjete. Najprije se izračunavaju karakteristične veličine u svakom konačnom elementu posebno (lokalno), a zatim se određenim transformacijama mogu izračunati za cijelu konstrukciju (globalno). U pravilu, s povećanjem broja konačnih elemenata (poguščivanjem mreže konačnih elemenata) dobiveno rješenje je točnije, naravno uz pravilnu formulaciju konačnih elemenata.

6.1.1 3D konačni elementi [5]

Ovi se elementi koriste kada je geometrija ili opterećenje prekompleksno da bi se problem rješavao nekim drugim tipom elemenata s manje prostornih dimenzija, jer je za postizanje iste točnosti kao za jednodimenzijske i dvodimenzijske probleme potreban mnogo veći broj stupnjeva slobode. Odnosno, pri 3D analizi valja računati sa znatno većim brojem nepoznanica (računalno zahtjevnije). Stupnjevi slobode kod 3D elemenata su 3 translacije u svakom čvoru (1, 2 i 3), dok su kod 2D elemenata aktivni samo stupnjevi slobode 1 i 2. Kod ovih elemenata su izlazne varijable (npr. naprezanje i deformacije) vezane uz globalni Kartezijev koordinatni sustav (*default*), ali je izlazne varijable moguće vezati uz definirani, lokalni koordinatni sustav. [5]

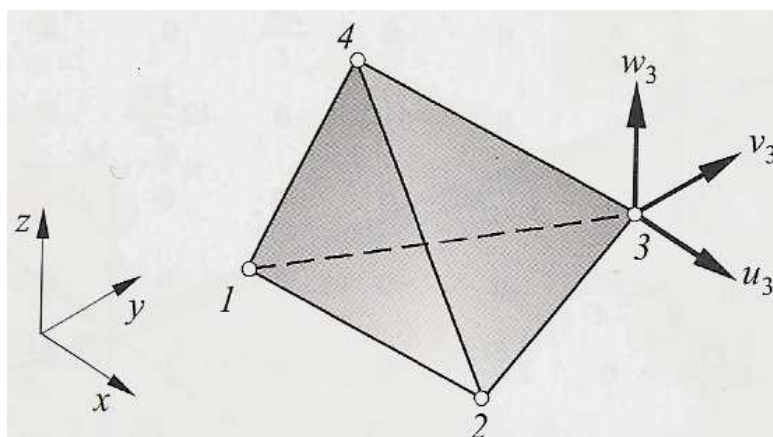
Osim problema porasta broja stupnjeva slobode kada se bira 3D element, čime simulacija postaje računalno zahtjevnija, treba još upozoriti na sljedeće. Kad je god moguće bolje je koristiti elemente u obliku paralepipeda ili tetraedarske elemente drugog reda. Razlog ovome je što raspodjela pomaka osnovnog tetraedarskog elementa (prvog reda s 4 čvora) opisana s potpunim polinomima prvog stupnja. To znači da je raspodjela pomaka po plohi tetraedra linearna, a raspodjela deformacije koja je određena matricom **B** konstantna. Isto tako je i

raspodjela naprezanja kod tog elementa konstanta jer je matrica naprezanja jednaka umnošku matrice elastičnosti \mathbf{D} koja je konstantna i matrice \mathbf{B} ($\mathbf{S} = \mathbf{DB}$). S obzirom da je raspodjela deformacije i naprezanja konstantna, potrebno je imati vrlo gustu mrežu da bi se moglo dobro aproksimirati realnu raspodjelu naprezanja, pogotovo ako je problem takav da se pojavljuje veliki gradijent naprezanja. [6]

6.1.2 Osnovni tetraedarski element [5]

Najjednostavniji konačni element za trodimenzijsku analizu kontinuuma je osnovni tetraedarski element s 12 stupnjeva slobode, slika 6.1. Element se sastoji od 4 čvora u vrhovima tetraedra s po tri komponente pomaka u , v i w u pravcu Kartezijevih koordinatnih osi. Stupnjevi slobode su komponente pomaka u čvorovima

$$\mathbf{v}^T = [u_1 \quad v_1 \quad w_1 \quad u_2 \quad v_2 \quad w_2 \quad u_3 \quad v_3 \quad w_3 \quad u_4 \quad v_4 \quad w_4]. \quad (6.1)$$



Slika 6.1 Osnovni tetraedarski konačni element [5]

Raspodjela pomaka opisana je potpunim polinomima prvog stupnja

$$\begin{aligned} u &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4z \\ v &= a_5 + a_6x + a_7y + a_8z \\ w &= a_9 + a_{10}x + a_{11}y + a_{12}z \end{aligned} \quad (6.2)$$

Izrazi (6.2) se obično prikazuju u matričnom zapisu

$$\mathbf{u} = \mathbf{a}\mathbf{a} : \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x & y & z & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x & y & z & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x & y & z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_7 \\ a_8 \\ a_9 \\ a_{10} \\ a_{11} \\ a_{12} \end{bmatrix}. \quad (6.3)$$

Uvrštavanjem rubnih uvjeta za čvorove od 1 do 4 pomoću (6.3) dobiva se

$$\mathbf{v} = \mathbf{Ca} : \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \vdots \\ w_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_1 & y_1 & z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_2 & y_2 & z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ \vdots \\ a_{12} \end{bmatrix}. \quad (6.4)$$

Matrica funkcija oblika glasi

$$\mathbf{N} = \boldsymbol{\alpha} \mathbf{C}^{-1} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 \end{bmatrix}. \quad (6.5)$$

Funkcije oblika moguće je kraće zapisati analognim relacijama za osnovni trokutni element

$$N_i = \frac{1}{6V} (\alpha_i + x\beta_i + y\gamma_i + z\delta_i), \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (6.6)$$

gdje je V volumen tetraedra

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}, \quad (6.7)$$

za $i = 1$ koeficijenti $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \delta_1$ jednaki su

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}, \quad \beta_1 = - \begin{vmatrix} 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \\ \gamma_1 &= - \begin{vmatrix} x_2 & 1 & z_2 \\ x_3 & 1 & z_3 \\ x_4 & 1 & z_4 \end{vmatrix}, \quad \delta_1 = - \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & 1 \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (6.8)$$

Ostali koeficijenti $i = 2, 3, 4$, određuju se pomoću analognih izraza uz cikličku zamjenu indeksa 1, 2, 3 i 4. Iz izraza (6.4) se vidi da se radi o linearnoj raspodjeli funkcije oblika. Njihov iznos u čvorovima na koje se odnose jednak je 1, dok je u ostalim čvorovima 0. Raspodjela pomaka po plohama tetraedra je linearna, pa se može jednoznačno opisati s pripadna tri stupnja slobode u čvorovima na vrhovima ploha, što govori da je zadovoljena kompatibilnost pomaka po plohama i da ovaj element pripada u skupinu konformnih elemenata. Ovaj element ima mogućnost opisivanja pomaka krutog tijela i polja konstantnih deformacija, te zadovoljava uvjete za monotonu konvergenciju.

Deriviranjem funkcija oblika primjenom kinematičkog diferencijalnog operatora dobiva se matrica **B**

$$\mathbf{B} = \mathbf{D}_k \mathbf{N} = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} \beta_1 & 0 & 0 & \beta_2 & 0 & 0 & \beta_3 & 0 & 0 & \beta_4 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_1 & 0 & 0 & \gamma_2 & 0 & 0 & \gamma_3 & 0 & 0 & \gamma_4 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_1 & 0 & 0 & \delta_2 & 0 & 0 & \delta_3 & 0 & 0 & \delta_4 \\ \gamma_1 & \beta_1 & 0 & \gamma_2 & \beta_2 & 0 & \gamma_3 & \beta_3 & 0 & \gamma_4 & \beta_4 & 0 \\ 0 & \delta_1 & \gamma_1 & 0 & \delta_2 & \gamma_2 & 0 & \delta_3 & \gamma_3 & 0 & \delta_4 & \gamma_4 \\ \delta_1 & 0 & \beta_1 & \delta_2 & 0 & \beta_2 & \delta_3 & 0 & \beta_3 & \delta_4 & 0 & \beta_4 \end{bmatrix}, \quad (6.9)$$

koja pokazuje da su komponente tenzora deformacije u osnovnom tetraedarskom elementu konstante. Nakon množenja matrice elastičnosti za trodimenzijsko stanje naprezanja matricom **B**, može se zaključiti da je polje naprezanja u elementu također konstantno

$$\mathbf{S} = \mathbf{D}\mathbf{B} = [\mathbf{S}_1 \quad \mathbf{S}_2 \quad \mathbf{S}_3 \quad \mathbf{S}_4]. \quad (6.10)$$

Submatrice $\mathbf{S}_1 \dots \mathbf{S}_4$ prikazane su relacijom (6.10) za $i = 1 \dots 4$

$$\mathbf{S}_i = \frac{E}{6(1+\nu)(1-2\nu)V} \begin{bmatrix} \beta_i(1-\nu) & \gamma_i\nu & \delta_i\nu \\ \beta_i\nu & \gamma_i(1-\nu) & \delta_i\nu \\ \beta_i\nu & \gamma_i\nu & \delta_i(1-\nu) \\ \frac{\gamma_i}{2}(1-2\nu) & \frac{\beta_i}{2}(1-2\nu) & 0 \\ 0 & \frac{\delta_i}{2}(1-2\nu) & \frac{\gamma_i}{2}(1-2\nu) \\ \frac{\delta_i}{2}(1-2\nu) & 0 & \frac{\beta_i}{2}(1-2\nu) \end{bmatrix}, \quad (6.11)$$

gdje je matrica **D** matrica elastičnosti, a glasi

$$\mathbf{D} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}. \quad (6.12)$$

Matrica krutosti izračunava se prema izrazu

$$\mathbf{k} = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV. \quad (6.13)$$

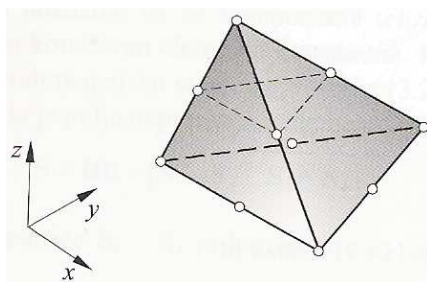
6.1.3 Tetraedarski elementi višeg reda [5]

Dodavanjem čvorova osnovnom tetraedarskom elementu izvodi se tetraedarski element višeg reda, slika 6.2. Pritom je poželjno da polinomi funkcija pomaka budu potpuni. Pomoću potpunog polinoma drugog stupnja opisano je polje pomaka tetraedarskog elementa drugog reda s 10 čvorova i 30 stupnjeva slobode. Komponente pomaka u Kartezijevom koordinatnom sustavu su

$$u = a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5x^2 + a_6y^2 + a_7z^2 + a_8xy + a_9yz + a_{10}zx \quad (6.14)$$

$$v = a_{11} + a_{12}x + a_{13}y + a_{14}z + a_{15}x^2 + a_{16}y^2 + a_{17}z^2 + a_{18}xy + a_{19}yz + a_{20}zx$$

$$w = a_{21} + a_{22}x + a_{23}y + a_{24}z + a_{25}x^2 + a_{26}y^2 + a_{27}z^2 + a_{28}xy + a_{29}yz + a_{30}zx$$



Slika 6.2 Tetraedarski konačni element drugog reda [5]

Budući da kinematički diferencijalni operator za računanje matrice **B** sadrži samo prve derivacije, red funkcija koje opisuju raspodjelu deformacije je za jedan red niži od reda funkcije raspodjele pomaka. Dakle, tetraedarski element drugog reda može opisati linearno polje deformacija. Funkcije raspodjele naprezanja istog su reda kao i funkcije raspodjele deformacija. Funkcije oblika izvedene su na taj način da se rabi numeriranje čvorova s četiri znamenke koje se povećavaju od nule do maksimalnog iznosa u vrhovima tetraedra. Npr., prva znamenka je jednaka nuli u čvorovima koji se nalaze na plohi za koju je koordinata $L_1 = 0$ te raste do maksimalne vrijednosti koja je pridružena čvoru u vrhu tetraedra nasuprot te plohe. Druga znamenka jednaka je nuli u čvorovima koji su na plohi za koju je $L_2 = 0$ i povećavaju se do maksimalnog iznosa na suprotnom vrhu. Analogno vrijedi i za ostale znamenke. Svi čvorovi leže u jednako razmaknutim ravninama koje su paralelne s plohama tetraedra. Ako je čvor označen s četiri znamenke, $klmp$, njemu pridružena funkcija oblika je jednaka.

$$N_{klmp}(L_1, L_2, L_3, L_4) = N_k(L_1)N_l(L_2)N_m(L_3)N_p(L_4), \quad (6.15)$$

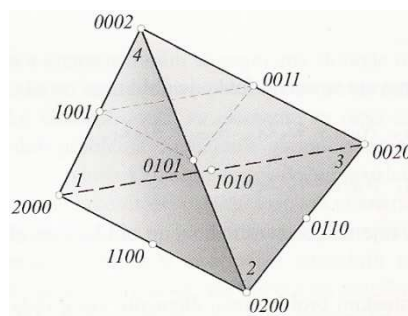
gdje su L_i ($i = 1, 2, 3, 4$) volumenske ili tetraedarske koordinate opisane relacijom

$$L_i(x, y, z) = \frac{1}{6V}(\alpha_i + \beta_i x + \gamma_i y + \delta_i z), \quad (6.16)$$

a funkcije $N_k(L_1), N_l(L_2), N_m(L_3), N_p(L_4)$ određuju se pomoću relacije

$$N_k(L_1) = \begin{cases} \prod_{i=1}^k \left(\frac{nL_1 - i + 1}{i} \right) & \text{za } k \geq 1 \\ 1 & \text{za } k=0 \end{cases}. \quad (6.17)$$

Zbroj indeksa određuje red funkcija oblika, $n = k + l + m + p$, a jednak je maksimalnom iznosu u vrhovima tetraedra.



Slika 6.3 Numeriranje čvorova za izvođenje funkcija oblika u prirodnim volumenskim koordinatama [5]

Funkcija oblika za čvor 1 (slika 6.3), koji je označen s 2000, prema (6.15) glasi

$$N_{2000}(L_1, L_2, L_3, L_4) = N_2(L_1)N_0(L_2)N_0(L_3)N_0(L_4). \quad (6.18)$$

Prema (6.17) funkcija $N_2(L_1)$ računa se na način

$$N_2(L_1) = \prod_{i=1}^2 \left(\frac{2L_1 - i + 1}{i} \right) = \frac{2L_1 - 1 + 1}{1} \frac{2L_1 - 2 + 1}{2} = L_1(2L_1 - 1), \quad (6.19)$$

a ostali članovi $N_0(L_2), N_0(L_3), N_0(L_4)$ su jednaki 1. Prema tome, funkcija oblika N_{2000} jednaka je $N_{2000} = L_1(2L_1 - 1)$.

Analogno se računaju funkcije oblika za ostale čvorove u vrhovima tetraedra

$$N_{0200} = L_2(2L_2 - 1)$$

$$N_{0020} = L_3(2L_3 - 1).$$

$$N_{0002} = L_4(2L_4 - 1)$$

Za čvor između vrhova 1 i 2 funkcija oblika glasi

$$N_{1100}(L_1, L_2, L_3, L_4) = N_1(L_1)N_1(L_2)N_0(L_3)N_0(L_4), \quad (6.20)$$

gdje je prema (6.17) $N_1(L_1) = 2L_1, N_1(L_2) = 2L_2, N_0(L_3) = 1, N_0(L_4) = 1$. Iz toga slijedi da je

$$N_{1100} = 4L_1L_2.$$

Na isti način se računaju ostale funkcije oblika

$$N_{0110} = 4L_2L_3, N_{1010} = 4L_1L_3, N_{1001} = 4L_1L_4, N_{0101} = 4L_2L_4, N_{0011} = 4L_3L_4 \quad (6.21)$$

6.2 Programski paket *Abaqus*

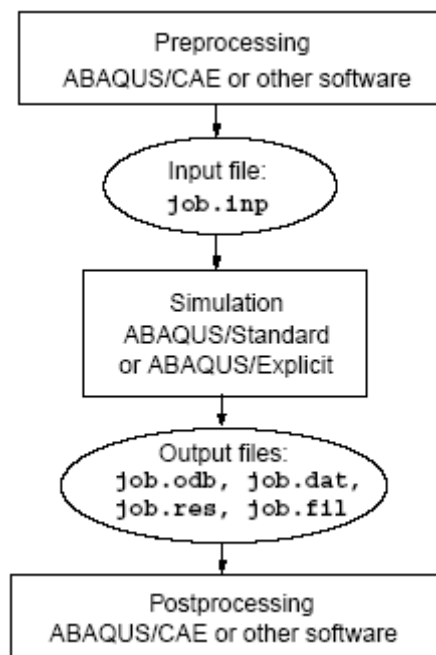
Abaqus je programski paket baziran na metodi konačnih elemenata, s kojim se može rješavati puno različitih problema, od najjednostavnijih linearnih do složenih nelinearnih. Sadrži golemu bazu elemenata kojima se može virtualno modelirati bilo kakva geometrija. Također je moguće modelirati mnoge materijale često korištene u strojarstvu, metale, polimere, kompozite itd. *Abaqus* se sastoji od dva osnovna proizvoda: *Abaqus/Standard* i *Abaqus/Explicit*.

Abaqus/Standard služi za analizu opće namjene linearnih i nelinearnih problema i biti će korišten tijekom izrade ovog rada.

Abaqus/Explicit služi za analizu posebne namjene s nešto drugačijom formulacijom konačnih elemenata. Primjer upotrebe su kratke tranzijentne pojave.

Abaqus/CAE je interaktivno grafičko sučelje za *Abaqus* koje služi za lako i brzo kreiranje modela. Tijek modeliranja kreće od kreiranja (ili importiranja) geometrije, podjele geometrije u regije koje je moguće opisati mrežom konačnih elemenata. Sljedeće što je potrebno napraviti je pridružiti prirodne i geometrijske rubne uvjete i materijalna svojstva. Geometrijski rubni uvjeti najčešće podrazumijevaju ograničavanje stupnjeva slobode modela,

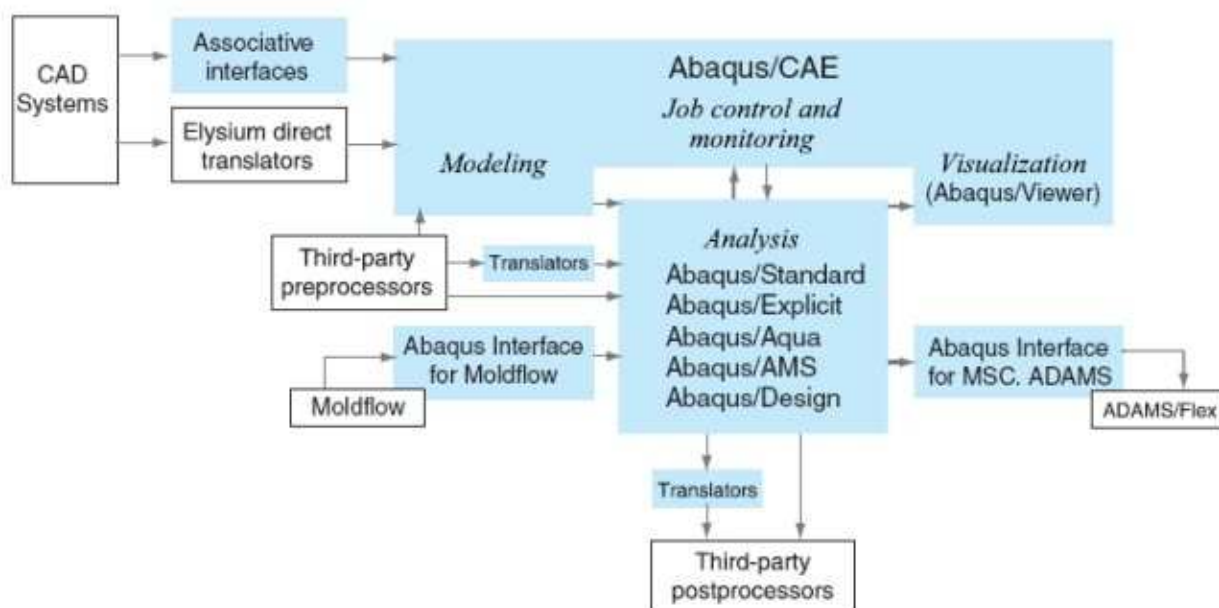
odnosno sprječavanje željenih translacijskih i rotacijskih pomaka (oslonci, uklještenja, rubni uvjeti simetrije itd.). Prirodni rubni uvjeti najčešće predstavljaju opterećenje modela tj. koncentrirane sile u čvorovima, ili raspodijeljeno volumensko, površinsko ili linijsko opterećenje. Do sada navedeno vrši se u radnoj cjelini koja se naziva *Preprocessing*. Općenito se rad u programu dijeli na tri radne cjeline (faze). *Preprocessing*, *Simulation* i *Postprocessing*. Na slici 6.4 prikazane su te faze i datoteke koje ih povezuju [6]



Slika 6.4 Tijek analize u programskom paketu Abaqus [6]

Samo modeliranje geometrije ne mora biti napravljeno u *Abaqus/CAE*-u, već može biti napravljeno u bilo kojem CAD programskom paketu te se taj model može importirati u *Abaqus/CAE*. Ustvari, cijelu fazu pretprocesiranja moguće je raditi uz pomoć nekog drugog programa.

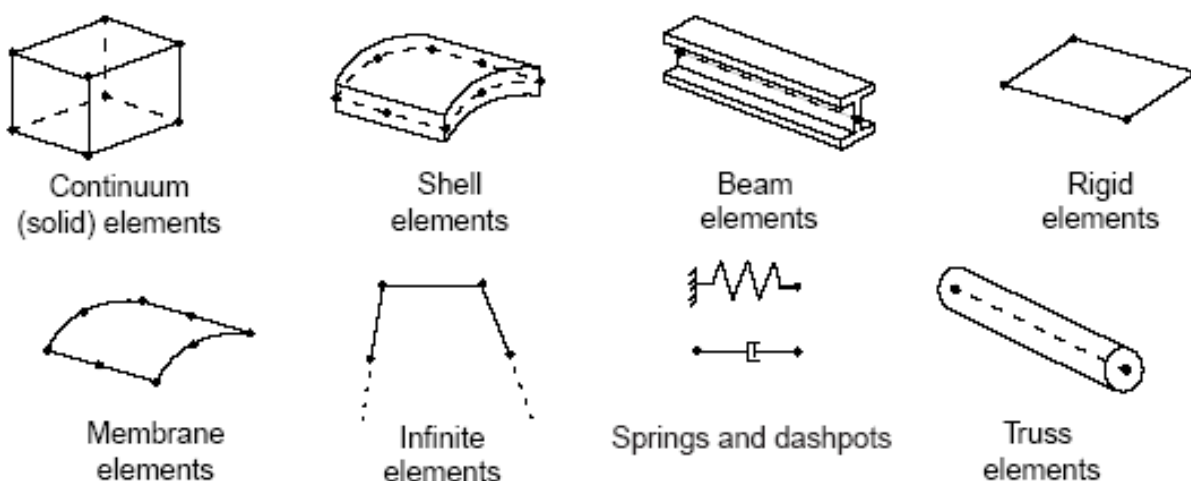
Isto tako faza postprocesiranja može biti izvršena u drugim programskim paketima, što se može vidjeti na slici 6.5.



Slika 6.5 Abaqus proizvodi i faze izrade modela [6]

U *Abaqusu* je dostupan veliki broj i široki spektar elemenata koji omogućuju rješavanje različitih problema, odnosno modeliranje različite geometrije. U ovom radu će biti korišteni elementi za analizu pomaka i naprezanja, međutim *Abaqus* ima biblioteku koja obuhvaća elemente za prijenos topline, difuziju mase, piezoelektričke elemente za akustičku analizu i još mnogo toga.

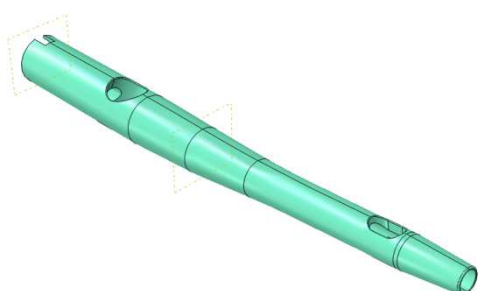
Slika 6.6. prikazuje osnovne tipove konačnih elemenata u *Abaqusu* koji se najčešće koriste.

Slika 6.6 Tipovi konačnih elemenata programskog paketa *Abaqus* [6]

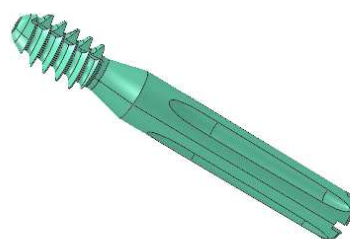
6.3 Numerički model gama čavla

Deformacije i naprezanja u pojedinim dijelovima gama čavla nije moguće odrediti pomoću servohidrauličke kidalice, a mjerenje tenzometrima je vrlo složeno. Metoda konačnih elemenata omogućuje jednostavnu analizu deformacija i naprezanja. Svrha provedbe numeričke analize je provjera maksimalnih progiba lag vijka gama čavla dobivenih kod dinamičkog ispitivanja, te mjesta maksimalnih naprezanja i deformacija.

Na osnovu tehničke dokumentacije zaprimljene od tvrtke Instrumentaria d.d. izrađeni su svi potrebni dijelovi modela za numeričku analizu, slike 6.7 i 6.8.

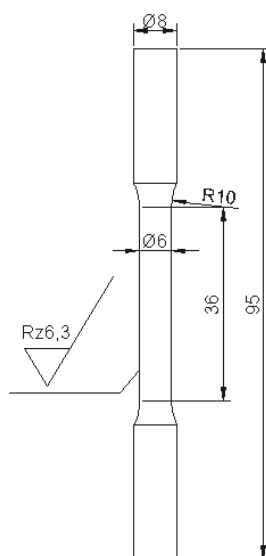


Slika 6.7 3D model čavla

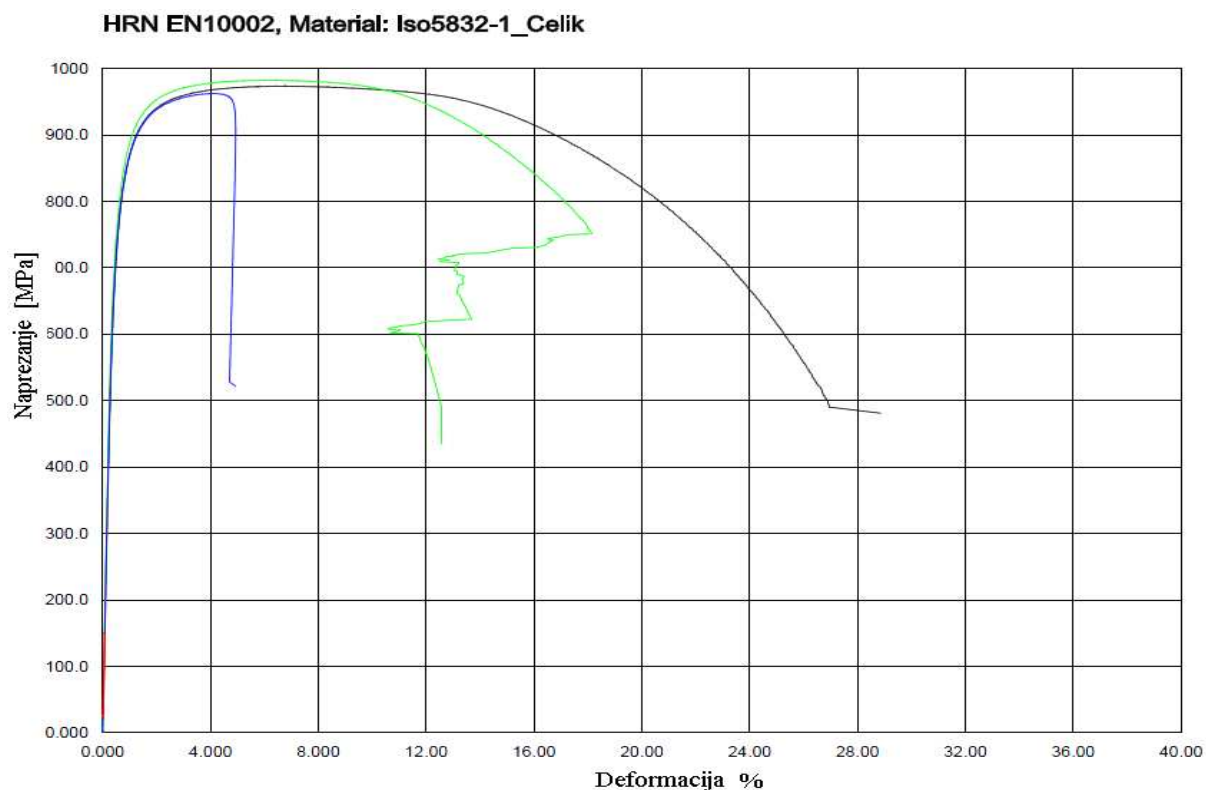


Slika 6.8 3D model lag vijka

Za numeričku analizu su potrebni podaci o materijalu te je stoga proveden statički vlačni pokus na standardnim epruvetama iz medicinskog čelika (ISO 5832-1). Dimenzije epruveta prikazane su na slici 6.9, a dijagram naprezanje-deformacija (σ - ϵ dijagram) na slici 6.10. Rezultati za modul elastičnosti, vlačnu čvrstoću i konvencionalnu granicu tečenja dani su u tablici 6.1



Slika 6.9 Dimenzije epruvete za statički vlačni pokus



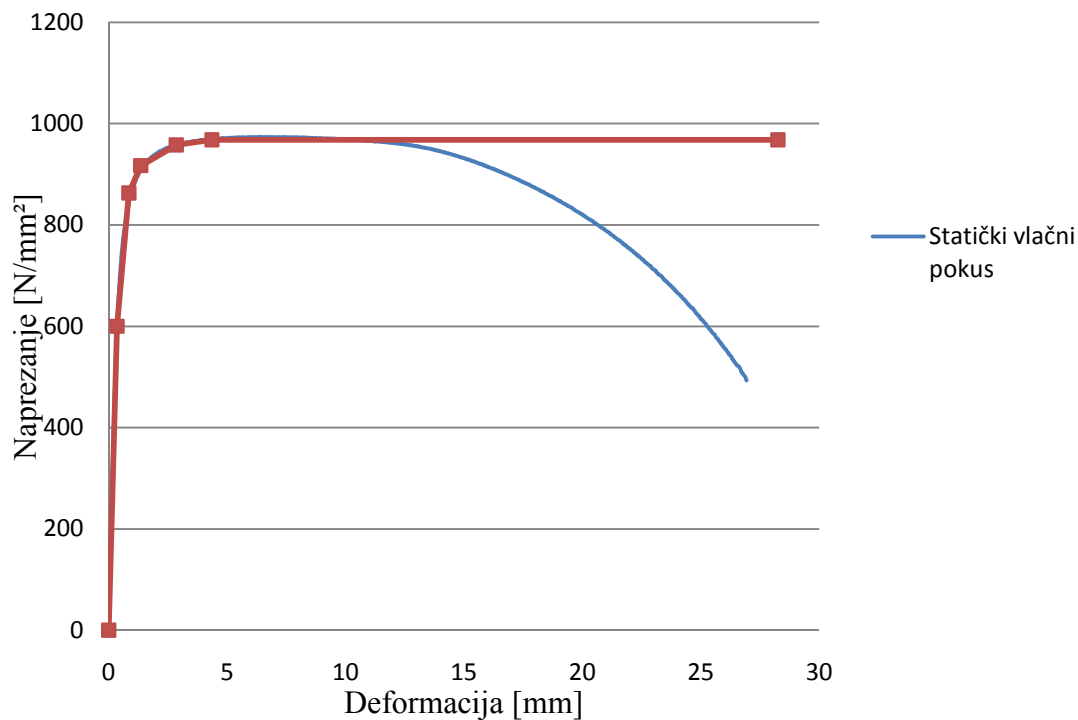
Slika 6.10 Dijagram naprezanje-deformacija za materijal prema ISO 5832-1

Tablica 6.1 Svojstva materijala

Materijal	d [mm]	A [%]	$R_{p0.2}$ [Mpa]	R_m [Mpa]	Ag [%]	E [Gpa]
ISO 5832-1	6,128	28,61	759,1	973,4	5,874	197,1

Kako je određivanje Poissonova koeficijenta složeno, vrijednost $\nu=0.3$ uzeta je prema literaturi. [9]

U probnim analizama javljala su se veća naprezanja, na mjestima kontakta lag vijka s provrtom u čavlu, od granice tečenja materijala. Stoga je zaključeno da na tim mjestima dolazi do plastične deformacije. Za takvu vrstu analize potrebni su podaci o ponašanju materijala u plastičnom području koji su dobiveni aproksimiranjem krivulje tečenja dotičnog materijala, slika 6.11 i tablica 6.2.



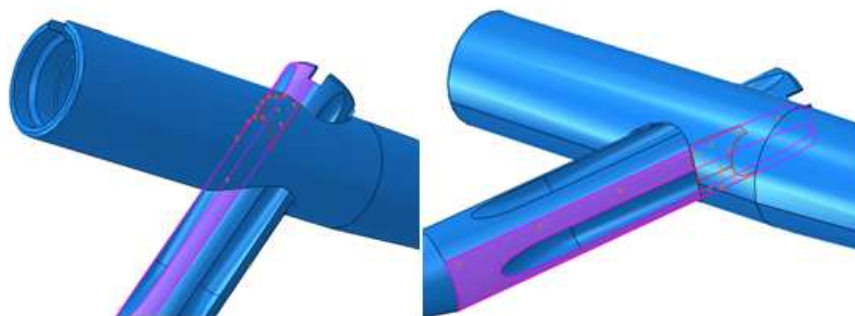
Slika 6.11 Aproximiranje krivulje tečenja materijala ISO 5832-1

Tablica 6.2 Vrijednosti naprezanja i deformacija za plastično područje

Naprezanje (MPa)	600	863	917	958	968
Deformacija (%)	0	0,5	1	2,5	4

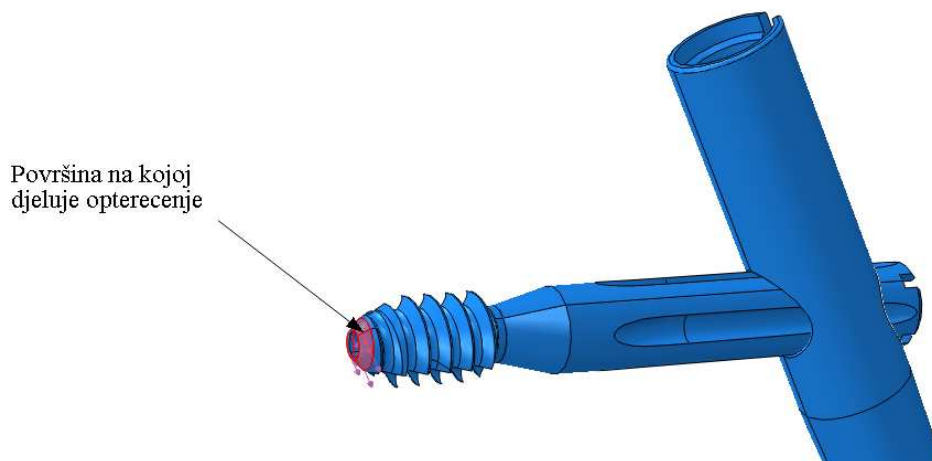
6.3.1 Definiranje mehaničkih veza, opterećenja i rubnih uvjeta

Numerički model gama čavla pojednostavljen je tako da su mu definirane čvrste veze između površina na kojima lag vijak naliježe na čavao uslijed opterećenja., slika 6.12.

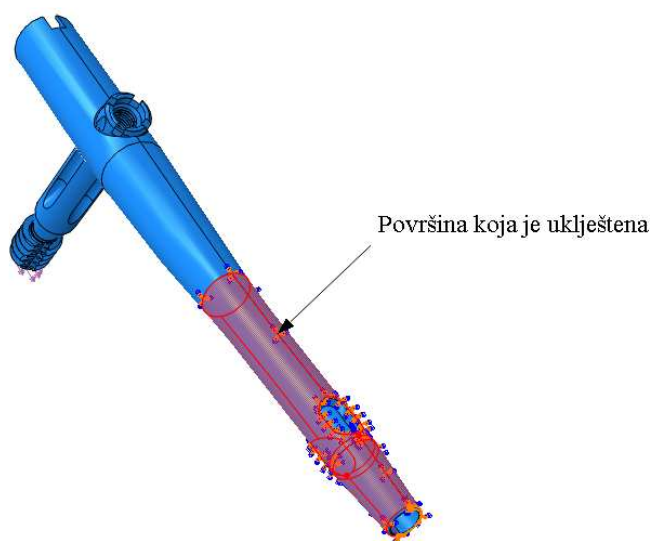


Slika 6.12 Prikaz površina na kojima je definirana čvrsta veza

U numeričkom modelu opterećenje je zadano kao pritisak koji djeluje paralelno s osi gama čavla na krajnjoj površini lag vijka (slika 6.13), a zadani rubni uvjeti prikazani su na slici 6.14.



Slika 6.13 Prikaz djelovanja opterećenja



Slika 6.14 Prikaz modela sa zadanim rubnim uvjetima

6.3.2 Generiranje mreže konačnih elemenata

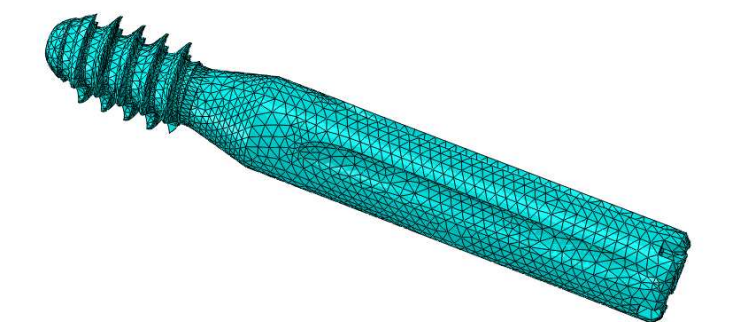
U analizi statičkog opterećenja gama čavla korišteni su tetraedarski konačni elementi drugog reda C3D10M.

Čavao je diskretiziran s 90922 konačnih elemenata, slika 6.15.



Slika 6.15 Prikaz mreže konačnih elemenata čavla

Lag vijak je diskretiziran s 80553 konačnih elemenata, slika 6.16.

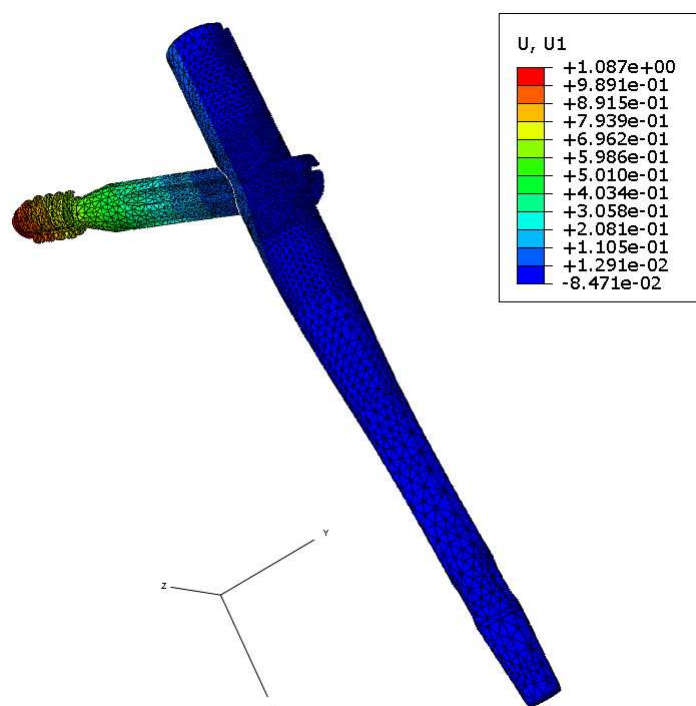


Slika 6.16 Prikaz mreže konačnih elemenata lag vijka

6.4 Analiza rezultata dobivenih metodom konačnih elemenata

6.4.1 Analiza pomaka gama čavla

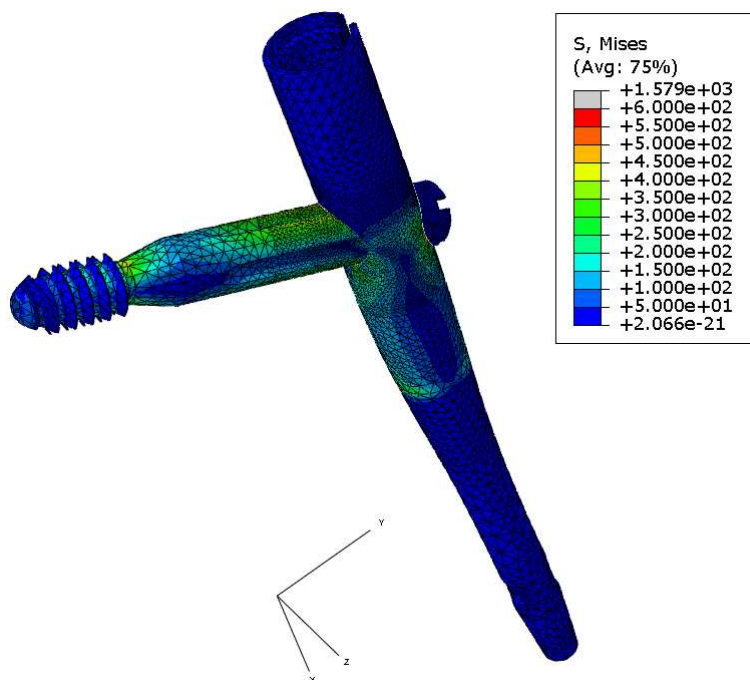
Numeričkim proračunom dobiveni su vertikalni pomaci koji su mjereni i u dinamičkom eksperimentu. Maksimalni progib lag vijka iznosi 1,087 mm pri opterećenju od $F=937,5$ N, slika 6.17. Dinamičkim ispitivanjem za taj pomak dobiveno je 1,108 mm što daje odstupanje numeričke simulacije od eksperimenta za približno 2%. Iz tih usporedbi može se zaključiti da numerički model dovoljno dobro opisuje stvarno stanje.



Slika 6.17 Vertikalni pomaci lag vijka pri opterećenju sa silom od 937,5 N

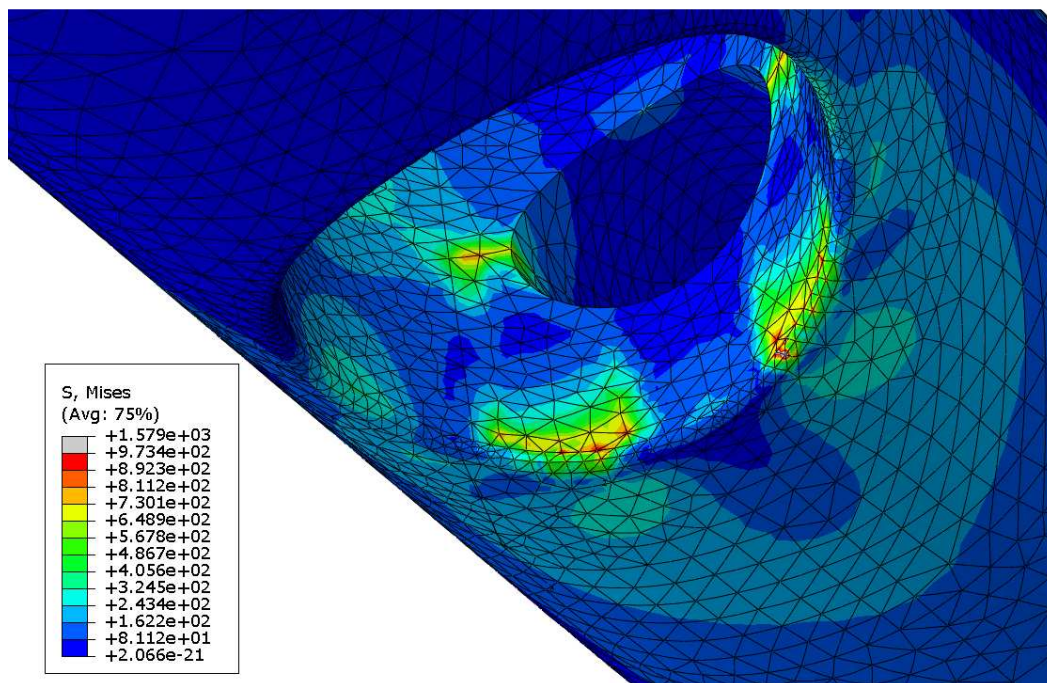
6.4.2 Analiza deformacija i naprezanja gama čavla

Naprezanja gama čavla prema Von Misesu prikazana su na slici 6.18.



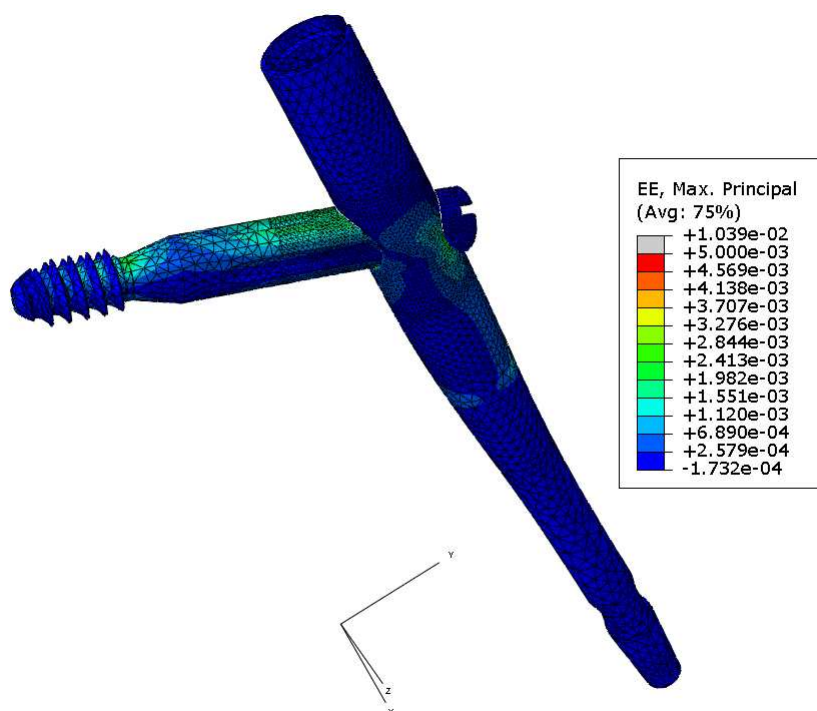
Slika 6.18 Naprezanja prema Von Misesu pri opterećenju sa silom od 937,5 N

Maksimalna naprezanja javljaju se na čavlu, na mjestu kontakta s lag vijkom, gdje je nastupila plastična deformacija, slika 6.19. Kako se u nekim čvorovima javljaju naprezanja veća od vlačne čvrstoće materijala, te vrijednosti smatraju se numeričkim greškama.



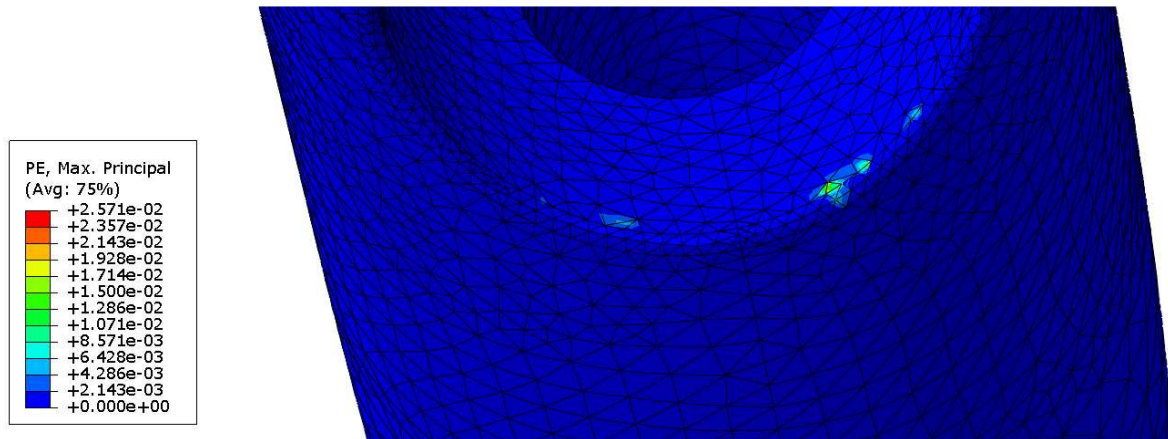
Slika 6.19 Prikaz maksimalnih naprezanja gama čavla

Deformacije gama čavla prikazana su na slici 6.20.



Slika 6.20 Deformacije pri opterećenju od 937,5 N

Plastične deformacije pojavljuju se u čavlu, na mjestu kontakta lag vijka i čavla, i prikazane su na slici 6.21.



Slika 6.21 Prikaz plastičnih deformacija pri opterećenju sa silom od 937,5 N

7. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bila je provjera ponašanja gama čavla pri cikličkom opterećenju prema normi ASTM F384-06. Ispitivanja su provedena na dva uzorka. Na prvom uzorku je provedeno statičko tlačno savijanje u svrhu dobivanja visine opterećenja za ispitivanje zamorne izdržljivosti drugog uzorka. Drugi uzorak ispitan je cikličkim opterećenjem sa silom od 93,75 N do 937,5 N u trajanju od 10^6 ciklusa pri frekvenciji od 5 Hz. Za vrijeme ispitivanja gama čavao nije pukao niti se mjerenje prekinulo zbog prevelikih deformacija, a maksimalan progib kod dinamičkog ispitivanja iznosio je 1,583 mm. Nakon ispitivanja vizualnim pregledom ustanovljeno je da ni na lag vijku niti na čavlu nisu nastupila veća trajna oštećenja.

Gore navedeno pokazuje da je visina opterećenja određena statičkim tlačnim savijanjem optimalna za određivanje dinamičke izdržljivosti ispitanog gama čavla. Rezultati također pokazuju da je konstruirani prihvatač zadovoljio sve zahtjeve norme vezano uz pozicioniranje i pridržavanje implantata kako tijekom statičkog tako i za vrijeme dinamičkog ispitivanja.

Pojednostavljenim numeričkim modelom za progib lag vijka dobiveno je 1,087 mm što predstavlja vrlo dobro poklapanje s eksperimentalno dobivenim rezultatom. Progib dobiven metodom konačnih elemenata manji je od eksperimentalno dobivene vrijednosti za 2%.

Provjera mehaničkih svojstava medicinskih implantata se prema zahtjevima normi uvijek provodi eksperimentalno. Međutim, rezultat za progib vijka dobiven računalnom simulacijom pokazuje da se mehanička svojstva implantata mogu uspješno provjeriti i numerički ili poslužiti kao verifikacija eksperimentalno dobivenih rezultata.

8. LITERATURA

- [1] Instrumentaria d.d.: Čavao proksimalno femuralni
- [2] Krmpotić-Nemanić, J., Marušić, A.: Anatomija čovjeka, Medicinska naklada, Zagreb, 2004.
- [3] Pećina, M. i suradnici: Ortopedija, Naklada Ljevak, Zagreb, 2004.
- [4] ASTM F 384–06 Standard Specification and Test Methods for Metallic Angled Orthopedic Fracture Fixation Devices, Weat Conshohocken, 2009.
- [5] Sorić, J.: Metoda konačnih elemenata, Golden marketing-Tehnička knjiga, Zagreb, 2004.
- [6] Surjak, M.: Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2009.
- [7] Abaqus 6.9.1. Documentation, Abaqus/CAE User's Manual, ABAQUS Inc.
- [8] Abaqus 6.9.1. Documentation, Abaqus Analysis User's Manual, ABAQUS Inc.
- [9] ISO 5832-1, Implants for surgery metallic materials, Part I: Wrought stainless steel, 1997.
- [10] Tomičević, Z.: Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2008.
- [11] Instruction manual, Servohydraulic fatigue testing machine, type LFE 50 HH, Walter+Bai, 2006.

9. PRILOG

1. Programski kod statičkog i dinamičkog ispitivanja za rad dinamičke kicalice
2. Tehnička dokumentacija novoizrađenih dijelova neophodnih za provedbu eksperimenta
3. Tehnička dokumentacija zaprimljena od tvrtke Instrumentaria d.d.